

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

**Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností struskového
kameniva**
Verification of the basic physical-mechanical properties of slag aggregate

Student:

Michal Pešata

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Boháčová

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Pešata**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností struskového kameniva**
Verification of the basic physical-mechanical properties of slag aggregate
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce je ověření základních fyzikálně-mechanických vlastností struskového kameniva (zrnitost, tvarový index, objemová a sypaná hmotnost, odolnost proti drcení, mrazuvzdornost, aj.) a hodnocení jeho použitelnosti do směsí stmelných hydraulickými pojivy.

Seznam doporučené odborné literatury:


SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. Praha, 2013, dostupné online na <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodas/sh/SH3v1.pdf>
VLČEK, J. *Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace*. Habilitační práce. Ostrava. VŠB-TU Ostrava, FMFI, 2008.
ČSN EN 13242. *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*. CEN, 2007.
ČSN EN 12620. *Kamenivo do betonu*. CEN, 2008.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Boháčová**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016


Ing. Libor Židek
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 2. 5. 2016

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v obsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnutou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je obráněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 2. 5. 2016

.....

Podpis studenta

Anotace

PEŠATA, Michal. *Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností struskového kameniva*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb, 2016, Ostrava.

Tato práce se zabývá použitím průmyslového odpadu – struskového kameniva ve stavebnictví. Okrajově popisuje jednotlivé druhy tohoto anorganického materiálu a řeší vhodnost jeho aplikace do stavebních konstrukcí s ohledem na fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Praktická část se zabývá třemi konkrétními frakcemi kameniva od výrobce DESTRO, spol. s r. o, která vzorky pro práci poskytl. V rámci možností laboratoře stavebních hmot FAST, VŠB-TUO, byly ověřeny vybrané fyzikálně-mechanické vlastnosti struskového kameniva. Závěrem jsou uvedeny možnosti použití zkoušeného kameniva ve stavební praxi na základě stanovených vlastností.

Klíčová slova: vysokopecní struska, zpracování a využití odpadu, zrnitost, fyzikální a mechanické vlastnosti

Annotation

Pešata, Michal. *Verification of the basic physical-mechanical properties of slag aggregate*. Ostrava, 2016. Bachelor thesis. VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Materials and Diagnostics of Structures, 2016, Ostrava.

This work deals with the use of industrial waste - slag aggregate in construction industry. Marginally describes the different types of inorganic material and addresses the appropriateness of its application in building structures with regard to physical, mechanical and chemical properties. The practical part deals with three specific fractions of aggregate of producer DESTRO, Ltd., which provided aggregate samples for the experiment. Within the bounds of possibility of Laboratory of building materials FAST, Technical University Ostrava, selected physical and mechanical properties of slag aggregate have been verified. In conclusion, the possibilities of using the tested aggregates in construction practice based on established properties are mentioned.

Keywords: blast furnace slag, processing and utilization of waste, grain size, physical and mechanical properties

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat zaměstnancům laboratoře FAST za poskytnutí normových podkladů a pomoc s provedením některých zkoušek. Velký dík patří také vedoucí mé práce, inženýrce Janě Boháčové, za trpělivost, ochotu a nespočet konzultací a odborných rad především v praktické části zkoušky. Samozřejmě dík patří také firmě DESTRO s.r.o., která poskytnutím vzorků vůbec umožnila vznik práce samotné. Výsledky práce byly pořízeny za přispění vybavení, pořízeného z projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin - Projekt udržitelnosti.

Obsah

1	Úvod	11
2	Druhy hutních strusek	12
2.1	Vysokopecní struska	12
2.2	Ocelářské strusky	12
2.2.1	Rozdělení ocelářských strusek	12
2.2.2	Chemické složení ocelářských strusek.....	15
2.2.3	Využití ocelářských strusek	15
2.3	Slévárenská struska	16
2.4	Struska z výroby feroslitin	16
2.5	Strusky z výroby neželezných kovů.....	17
3	Vysokopecní struska.....	18
3.1	Vznik a primární funkce strusky	18
3.1.1	Funkce strusky při výrobě surového železa	18
3.1.2	Struskotvorné přísady	18
3.1.3	Primární a konečná struska	19
3.2	Chemické složení vysokopecní strusky.....	19
3.3	Možnosti úpravy a využití vysokopecní strusky	20
3.3.1	Pomalu ochlazovaná struska	20
3.3.2	Granulovaná struska.....	21
3.3.3	Konstrukční zpěněná struska	22
3.3.4	Lehká zpěněná struska	24
3.3.5	Struskové izolace	24
4	Objemové změny vysokopecních strusek	25
4.1	Rozpad strusky	25
4.2	Studený odval	26
5	Popis vzorků struskového kameniva	27
5.1	Dodavatel kameniva	27

5.2	Popis kameniva	27
6	Ověření mechanických a fyzikálních vlastností	29
6.1	Zrnitost	29
6.1.1	Postup stanovení zrnitosti kameniva.....	29
6.1.2	Zrnitost struskového kameniva	31
6.2	Tvarový index	34
6.2.1	Postup stanovení tvarového indexu.....	34
6.2.2	Tvarový index struskového kameniva	35
6.3	Měrná hmotnost fileru	35
6.3.1	Postup stanovení měrné hmotnosti	36
6.3.2	Měrná hmotnost struskového fileru	38
6.4	Objemová hmotnost v odměrném válci	39
6.4.1	Postup stanovení objemové hmotnosti.....	39
6.4.2	Objemová hmotnost kameniva stanovená v odměrném válci.....	39
6.5	Objemová hmotnost stanovená pyknometricky a pórovitost	40
6.5.1	Postup stanovení objemové hmotnosti a pórovitosti	40
6.5.2	Objemová hmotnost struskového kameniva - pyknometricky.....	41
6.6	Sypná hmotnost volně sypaná a setřesená, mezerovitost.....	42
6.6.1	Postup stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti	42
6.6.2	Sypná hmotnost struskového kameniva.....	45
6.7	Odolnost proti drcení.....	48
6.7.1	Postup zkoušky stanovení otlukovosti pomocí metody LA.....	48
6.7.2	Odolnost proti drcení struskového kameniva.....	50
6.8	Nasákavost	51
6.8.1	Postup stanovení nasákavosti kameniva	51
6.8.2	Nasákavost struskového kameniva	52

6.9	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	53
6.9.1	Postup stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování.....	54
6.9.2	Odolnost struskového kameniva proti zmrazování a rozmrazování	55
6.10	Pevnost v tlaku	57
6.10.1	Postup stanovení pevnosti kameniva v tlaku	57
6.10.2	Pevnost struskového kameniva v tlaku	57
6.11	Chemické složení – spektrometrie a termální analýza	60
6.11.1	Princip spektrometrie	60
6.11.2	Chemické složení stanovené spektrometrem	60
6.11.3	Princip termální analýzy	61
6.11.4	Obsah částic stanovených termální analýzou.....	61
7	Zhodnocení použitelnosti kameniva v hydraulicky stmelených směsích	62
7.1	Granulometrické vlastnosti.....	62
7.2	Mechanické vlastnosti	62
7.3	Chemické vlastnosti	62
8	Závěr.....	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam použité literatury	66
	Seznam příloh	73

Seznam použitého značení

A	plocha [mm ²]		
d	průměr otvorů síta [mm]		
F	zatěžovací síla [N]		
FR	úbytek hmotnosti po zkoušce mrazuvzdornosti [%]		
LA	součinitel Los Angeles [-]		
m	hmotnost [g]		
p	pórovitost [%]		
SI	tvarový index [-]		
v	mezerovitost [%]		
V	objem [ml]		
WA	nasákavost [%]		
ρ	měrná hmotnost [Mg.m ⁻³]		
ρ_b	sypná hmotnost – volně sypaná [Mg.m ⁻³]		
ρ_{bs}	sypná hmotnost – v setřeseném stavu [Mg.m ⁻³]		
ρ_v	objemová hmotnost [Mg.m ⁻³]		
ρ_w	objemová hmotnost vody [Mg.m ⁻³]		
σ	pevnost	v tlaku	[MPa]

1 Úvod

Strusky obecně řadíme z hlediska stavební praxe mezi umělý anorganický materiál. Jedná se o vedlejší produkt hutního průmyslu při výrobě železa a oceli. V minulosti končil veškerý struskový materiál jako odpad skladovaný na haldách, a jediné využití bylo v rámci hutí samotných, kdy se z vychladlé taveniny magneticky separovali kovové části pro opětovné použití při výrobě železa nebo oceli. Nicméně v minulém století se postupně jednotlivé druhy strusek, především strusky vysokopecní, začaly používat i v jiných odvětvích průmyslu, zejména ve stavebnictví.

V současné době je vhodné se zamyslet do budoucna a omezit množství tzv. primárních surovin, neboť máme omezené, vyčerpitelné zdroje, jejichž návratnost je v řádech desítek milionů let. Taktéž z hlediska životního prostředí je těžba hornin a výroba cementu či vápna velmi neekologická, jedná se totiž o podstatného producenta CO_2 ve světě. Je proto jak z ekologického, tak často i z ekonomického hlediska velmi vhodné využít suroviny druhotné. Především v okolí producentů těchto materiálů může jít o cenově zajímavou alternativu a přitom o hodnotný a odolný materiál.

Nicméně, s uplatněním alternativních materiálů je spojené riziko, neboť často tyto suroviny vykazují nestálost a nejednotnost chemického složení, což se negativně projevuje na jejich mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech, které jsou zásadní pro jejich možné využití ve stavební praxi. U struskového kameniva se jedná především objemové změny, které se projevily například u nechvalně známé dálnice D47.

Cílem této práce je stanovení vybraných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností, s ohledem na možnosti laboratoře staveních hmot FAST VŠB-TUO, které jsou u kameniva z hlediska využití ve stavebnictví podstatné, a porovnání výsledků experimentů s hodnotami deklarovanými na technických listech výrobce kameniva. Na základě experimentální části bude v závěru práce vyhodnocena vhodnost použití kameniva do hydraulicky stmelených směsí.

2 Druhy hutních strusek

Strusky jsou pevné druhotné produkty, někdy také označovány jako přetavený odpad, nejčastěji z hutního průmyslu. Vznikají z taveniny nekovových složek rud, struskotvorných přísad a zbytků paliv. Existuje mnoho druhů strusek, nejběžnější dělení při použití ve stavebnictví je podle původu. V práci zkoumané vzorky strusky pochází z odvalu v okolí Kladna, kde se vyrábělo železo a ocel, některé další strusky jsou zde stručně zmíněny pro úplnost přehledu problematiky. [1, 2]

2.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká při výrobě surového železa. Železné rudy kromě samotného železa obsahují i jiné doprovodné prvky, které se nazývají hlušiny. Z toho důvodu se do vsázky přidávají struskotvorné přísady, které po roztavení na sebe tyto nechtěné prvky vážou. Podrobněji se vysokopecní strusce věnuje kapitola č. 3. [4, 5]

2.2 Ocelářské strusky

Vznikají během zpracování surového železa na ocel. Oproti vysokopecním struskám mají různorodější složení, které se odvíjí od druhu a vlastností konkrétní vyráběné oceli. Na rozdíl od vysokopecní strusky rovněž obsahují ve větší míře i železo (Fe). Druhy ocelářských strusek se dělí podle způsobu výroby oceli na strusky ze Siemens-Martinských pecí, strusky z kyslíkových konvektorů, strusky z elektrických obloukových pecí a strusky sekundární metalurgie. [3, 8, 10]

2.2.1 Rozdělení ocelářských strusek

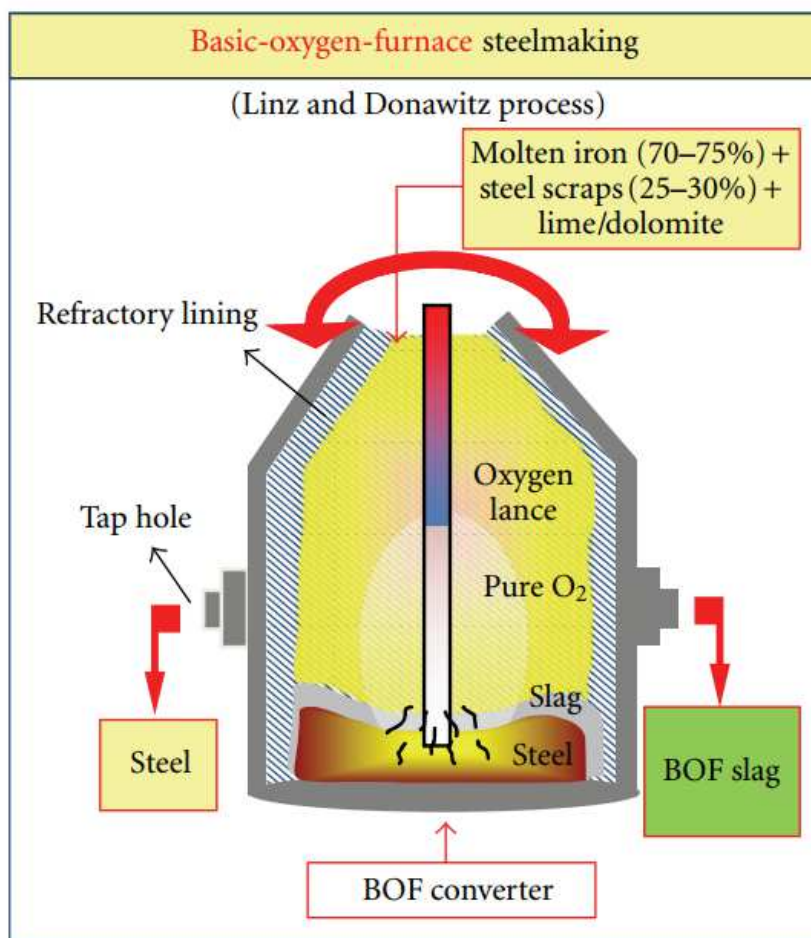
a) Siemens-Martinské strusky

Proces výroby oceli v Siemens-Martinských pecích byl postupně utlumován a nahrazován modernějšími a ekonomicky výhodnějšími způsoby. V 90. letech 20. století byla naprostá většina pecí tohoto typu odstavena. V současné době se v Evropě tyto pece nachází pouze v ukrajinských ocelárnách. Z toho důvodu se můžeme setkat se struskou z těchto pecí pouze v podobě odpadu na odvalech. Takový materiál není vhodné ve stavebnictví využívat, jelikož kromě strusky ocelářské obsahuje nejen strusku vysokopecní, ale i další odpadní materiál,

například staré vyzdívky pecí, železný odpad a další látky, které mohou způsobovat problémy s objemovými změnami. Dokonce je v některých evropských západních zemích a v USA zakázáno používat materiál z odvalů jako kamenivo pro stavební účely. [3, 7, 9]

b) Strusky z kyslíkových konvektorů

Konvektory jsou nejrozšířenější způsob výroby oceli, ve světě jsou tímto způsobem vyrobeny dvě třetiny veškeré její produkce, u nás se jedná dokonce o více než 90 %. Proces výroby oceli je mnohem efektivnější a rychlejší. Začíná smícháním ocelového šrotu s roztaveným železem v konvektoru, do kterého je vháněn čistý kyslík. Dochází k roztavení ocelového šrotu, snížení obsahu uhlíku a odstranění chemických prvků železa. K tomu jsou využívány struskotvorné přísady (nejčastěji vápno - CaO , nebo dolomit - $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$), které v kombinaci s nečistotami a zásaditou vyzdívkou tvoří strusku. Ta plave na roztavené oceli a až po provedení odpichu oceli, dojde k odpichu strusky otočením konvektoru opačným směrem. Struska se ochladí a je připravena na následné úpravy a použití. [3, 7, 9, 10, 11]



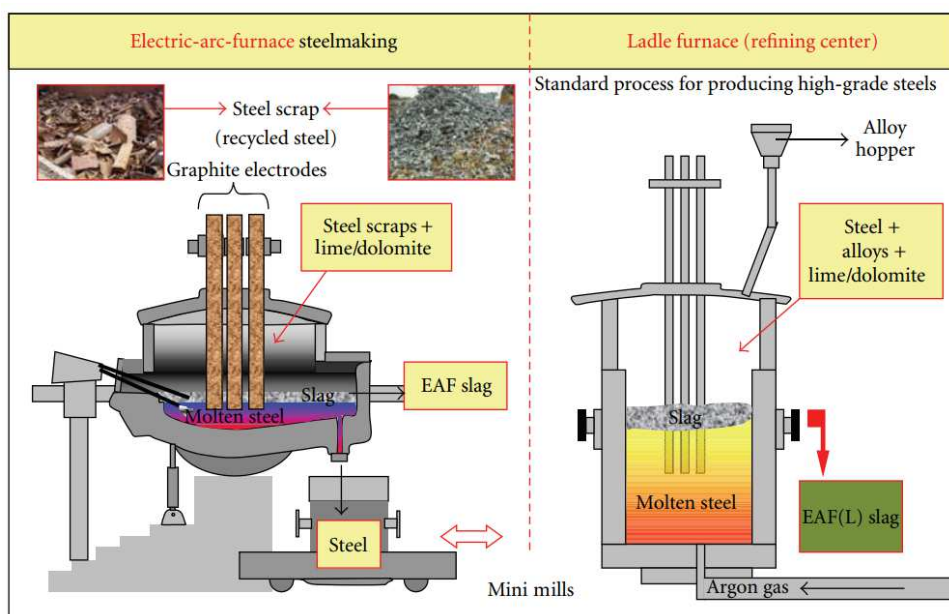
Obrázek 1 - Schéma kyslíkového konvektoru (BOF) [10]

c) Strusky z elektrických obloukových pecí

Elektrické ocelové pece se používají pro výrobu ušlechtilé oceli. Ve světě je takto vyrobena asi třetina z celkové její produkce, u nás však méně než 10 %. Výroba oceli v elektrické peci je jedním z největších světových spotřebitelů elektrické energie, a proto je nákladnější než použití kyslíkových konvektorů. Hlavním rozdílem oproti předchozímu způsobu je, že na roztavení a udržení teploty ocelového šrotu a surového železa je místo technologie vhánění kyslíku použit elektrický oblouk. Po naplnění pece jsou do taveniny spuštěny grafitové elektrody, dochází k zažehnutí oblouku a začne vznikat vysoké teplo. Elektrody se spouští hlouběji a vzniká opět struska (i v elektrické peci jsou přidávány struskotvorné přísady). Odpich strusky také probíhá odděleně a struska je dále zpracována. [7, 9, 10, 11]

d) Strusky sekundární metalurgie

Ocel z předchozích typů pecí může být dále upravována za účelem zlepšení vlastností, především u vysokojakostních ocelí. Proces probíhá v pánvových pecích ve vakuu. Pánvová pec se příliš neliší od elektrické pece, i zde je využíván elektrický oblouk, avšak je pro zvýšení účinku do spodní části pece dávkován argon a do taveniny se přidávají legující přísady podle požadavků kladených na výslednou ocel. Obsah nečistot ve výsledné oceli je díky těmto procesům v řádu tisícín procenta. [7, 10, 11]



Obrázek 2 - Schéma elektrické obloukové pece (EAF) a pánvové pece (LD) [10]

2.2.2 Chemické složení ocelářských strusek

Chemické složení strusky z kyslíkového konvektoru a strusky z elektrické obloukové pece je relativně podobné. Hlavní sloučeninou ocelářské strusky je oxid vápenatý (CaO), oxidy železa (podle účinnosti pece buď FeO nebo Fe₂O₃, přičemž celkový obsah může být více než 35 %), oxid křemičitý (SiO₂) a oxid hořečnatý (MgO). V případě strusky z elektrické pece zde máme ještě výskyt oxidu hlinitého (Al₂O₃). Přesné složení obou strusek se nachází v tabulce č. 1. Chemické složení strusek z pánvových pecí bývá značně různorodé, liší se podle druhu oceli a podle zvolených legujících přísad. Obecně lze tvrdit, že obsah oxidů železa je nižší než u ostatních strusek, a naopak, oxid vápenatý a hlinitý bude mít vyšší zastoupení. [10, 11]

Tabulka 1 – porovnání chemického složení ocelářských strusek [10]

Sloučenina	Obsah [%]	
	Struska z kyslíkového konvektoru	Struska z elektrické obloukové pece
CaO	46,2	33,3
SiO ₂	11,8	15,5
Al ₂ O ₃	2,1	7,6
MgO	6,7	5,6
FeO	18,0	20,8
Fe ₂ O ₃	18,7	26,4
SO ₃	0,2	0,3
MnO	2,9	4,6
TiO ₂	0,8	0,7
P ₂ O ₅	2,0	0,6

2.2.3 Využití ocelářských strusek

V hutnickém průmyslu je snaha o co největší využití ocelářských strusek opětovně při výrobě železa a oceli. Nejstarší použití některých ocelářských strusek bylo jejich přidávání do vsázky vysoké pece. I v současné době jsou ze strusky separovány kovové částice, které se následně využijí ve výrobě kovů. Vychladlá struska se drtí a za pomoci magnetu jsou z ní odstraněny největší ocelové slitky (velmi kvalitní kovový materiál, vhodný pro výrobu oceli). Zbylý, hrubě podrcený podíl se opět mele a drtí a magnetickou separací je odstraněn další, jemnější kovový materiál pro použití v ocelárně a vysokých pecích. Zbylý nekovový materiál je využíván ve stavebnictví. Použít jemně mletou ocelářskou strusku jako přísadu

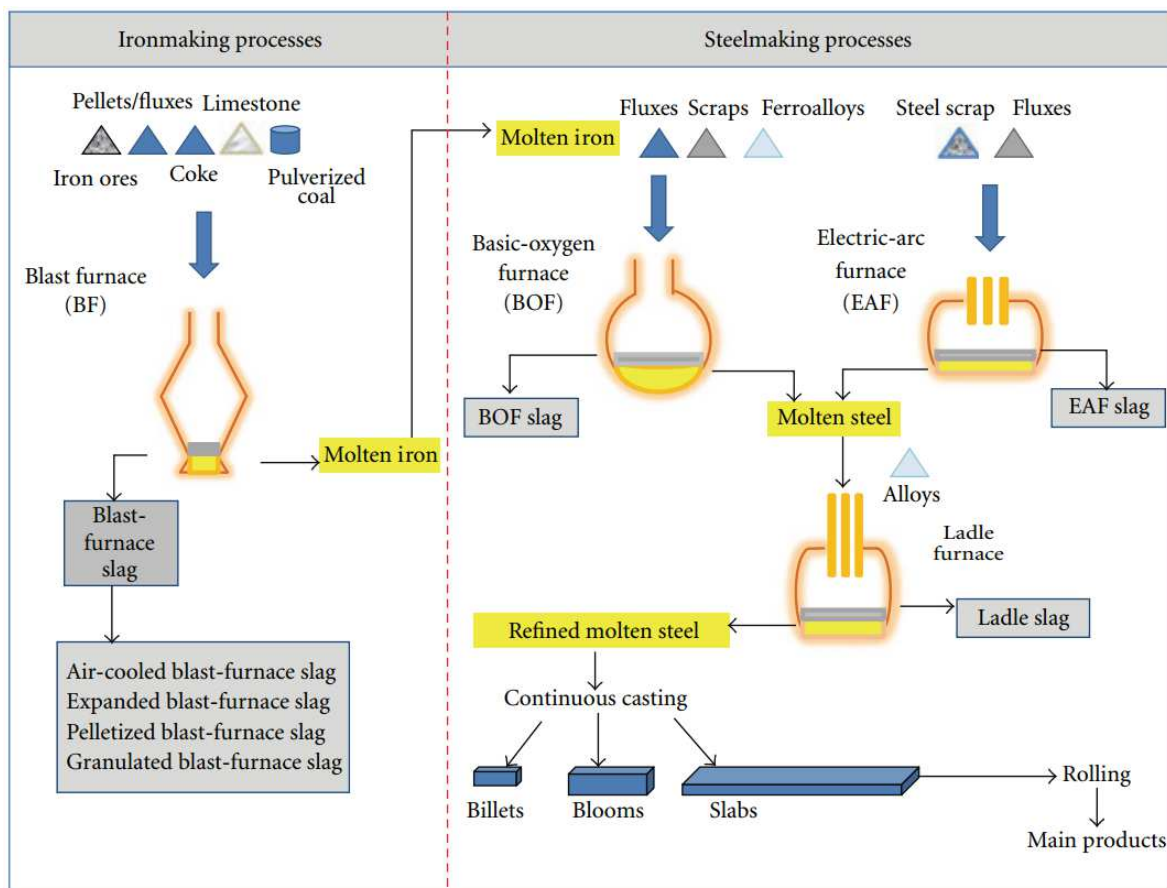
nebo součást cementu není obvyklé, jedná se spíše o laboratorní experimenty a drtivá většina ocelářské strusky končí jako kamenivo. Velmi jemně mleté zásadité ocelářské strusky se také používají jako hnojivo v zemědělství. [3, 8, 9]

2.3 Slévárenská struska

Slévárenství je způsob výroby kovových výrobků odlitím do forem. Množství strusky je při takovém způsobu relativně malé a navíc struska obsahuje vysoký podíl železa, tudíž je zpravidla recyklována v rámci hutnického průmyslu. [5, 11]

2.4 Struska z výroby feroslitin

Feroslitiny jsou polotovary, které se využívají jako přísady při legování oceli. Jsou tvořeny podílem železa (méně jak 50 %) a dalšími prvky, které utvářejí výsledné vlastnosti oceli. Existuje celá řada feroslitin, a proto i jejich strusky mají různé chemické složení a jejich použití je tím značně omezené. [3, 7, 18]



Obrázek 3 - Celkové schéma výroby železa a oceli [10]

2.5 Strusky z výroby neželezných kovů

Rovněž při výrobě neželezných kovů vzniká struska. Použití této strusky v České republice a Evropě nebylo realizováno, nicméně bývá používána v amerických zemích (USA, Kanada). Ačkoliv je objem těchto strusek v porovnání se struskami z výroby železa a oceli výrazně menší, je jejich chemické složení mnohem více různorodé. Nejběžněji se ve světě setkáme s využití strusek z výroby mědi a niklu, které mají podobné vlastnosti. [13, 14, 15, 16]

a) Struska z výroby mědi

Měděné strusky jsou opět využívány při produkci mědi, pokud obsahují více než 10 % Cu. V opačném případě jsou použity ve stavebnictví či jiném odvětví. V USA je měděná struska používána jako kamenivo do asfaltových směsí. [12, 14, 15, 16, 17]

b) Struska z výroby niklu

Tyto strusky mají vlastnosti podobné struskám z výroby mědi. Jejich použití je stejně jako u předchozí strusky jako kamenivo do asfaltových směsí nebo i kamenivo do kolejového lože. [13, 14, 15, 16, 17]

c) Strusky z výroby olova

Zde se můžeme setkat se dvěma druhy strusky. Struska ze staršího způsobu výroby olova, se kterou se v dnešní době setkáme prakticky pouze v podobě uloženiny na skládce, se vyznačuje vysokou odolností proti klimatickým vlivům. Novější strusky z recyklace olova jsou velmi problematické, neboť obsahují vysoké procento soli, a jejich použití ve stavebnictví je prakticky vyloučeno. Starší typ strusky je využíván jako kamenivo do asfaltových krytů vozovek. [13, 17]

d) Struska z výroby zinku

Podobně jako strusky z výroby olova lze i podrcenou strusku z výroby zinku využívat jako kamenivo do asfaltových vozovek. Zinková struska bývá rovněž využívána jako součást směsi na výrobu keramických obkladaček. [14, 15, 16, 17]

3 Vysokopecní struska

3.1 Vznik a primární funkce strusky

3.1.1 Funkce strusky při výrobě surového železa

Primární funkcí strusky je vázat na sebe hlušiny a umožnit, aby z železné rudy vzniklo čisté, surové železo. Musí mít také správnou viskozitu, jelikož poté, co dojde k redukci železa a odsíření, struska chrání tekuté surové železo. V současné době v České republice probíhá výroba železa pouze v závodě ArcelorMittal v Ostravě a v Třineckých železárnách.

3.1.2 Struskotvorné přísady

Hlavní neželezné složky hlušiny a tedy i výsledné strusky mají teplotu tavení často nad 2500 °C, avšak teplota ve vysoké peci se pohybuje maximálně do 2000 °C. I kdyby se hlušiny zahřály až na teplotu jejich tavení, výsledná struska by byla příliš hustá. Proto se pro snadnější vznik strusky používají struskotvorné přísady, které se přidávají do vsázky vysokých pecí. Díky přísadám dále dosahujeme vhodných vlastností strusky, především schopnosti odsíření a redukce kovu. V drtivé většině případů jsou struskotvorné přísady zásadité, protože železná ruda i zbytky paliva jsou kyselé. [4, 5, 18]

Mezi nejběžnější přísady patří uhličitan vápenatý - CaCO_3 , neboli vápenec, kdy jeho ideální složení je 56 % CaO a 44 % CO_2 . Přírodní vápenec obsahuje nečistoty v podobě oxidů hlinitého a křemičitého, jejich celková koncentrace však nesmí přesáhnout 3 %. Další možnou přísadou je dolomitický vápenec - CaMgCO_3 . Obsah hořčíku při koncentraci do 10 % má příznivý efekt na tekutost a odsiřovací schopnost. Podobné chemické složení má i dolomit - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, který se používá především při výrobě feromanganu. Specifický druh dolomitického vápence je ankerit - $\text{Ca}[\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}](\text{CO}_3)_2$, který obsahuje i uhličitan železnatý. [4, 5, 18]

Rovněž v minulosti se především v kladenských hutích používalo vypálené vápno – CaO . To je obzvlášť výhodné v kombinaci s chudou železnou rudou. Vápno taktéž částečně slouží jako palivo a snižuje tím potřebné množství koksu. Nicméně se na vzduchu rozpadá, a proto můžeme používat pouze vápno čerstvé. Navíc se ideálně vápno vypaluje pro hutnické potřeby

jen na zhruba 80 %, nicméně je při výrobě vápna problém regulovat teplotu, tudíž nelze tuto hodnotu zajistit, a proto se od využívání vápna upustilo. [4, 5, 18]

Kromě chemického složení je důležitá především zrnitost přísad, která by se měla pohybovat mezi 20 – 40 mm. Větší zrna by se nemusela kompletně roztavit, a naopak u menších zrn by došlo k zahlcení pece a zhoršení prodyšnosti vsázky. Další a výhodnější možností je přidávat vápenec již do aglomerátu, kde se ideální průměr zrn pohybuje kolem 3 mm. [4, 5, 18]

Existují také kyselé přísady, mezi nejpoužívanější z nich patří křemenec. Nicméně se používají pouze v ojedinělých specifických případech, například při použití zásadité železné rudy a kvalita jak výsledného železa, tak i strusky není příliš vysoká. [4, 5, 18]

3.1.3 Primární a konečná struska

Struska vzniká smícháním vsázky a jejím umístěním do pece, přičemž za počátek vzniku strusky se považuje taková teplota, při které začínají vstupní suroviny, především železné rudy, měknout a tento jev je doprovázen vznikem nových chemických látek neboli strusky. Při teplotě v rozmezí mezi 1100 - 1200 °C vzniká čerstvá neboli primární struska a od konečné strusky se liší především vysokým obsahem železa v podobě oxidu železnatého - FeO , dále obsahuje oxid vápenný - CaO a oxid křemičitý - SiO_2 . Teplota strusky postupně vzrůstá s jejím poklesem v peci a dochází k rozpouštění dalších oxidů z železné rudy, kromě oxidů vápenatého a křemičitého se jedná navíc i o oxid hlinitý - Al_2O_3 a hořečnatý - MgO . Vlivem teploty silně zásaditý oxid vápenatý a hořečnatý vytlačuje oxid železnatý, což způsobuje snížení množství železa v samotné strusce. V oblasti výfúcen se struska spojuje se zbytky koksu v podobě popela, stává se tekutou, odkapává do nístěje a dochází k odsíření železa. Obecně platí, že čím více je struska zásaditá, tím lépe proběhne odsíření surového železa. Na konci vysokopecního pochodu dochází k odpichu strusky do struskových ocelových pánví kuželovitého tvaru se zaobleným dnem na upraveném železničním podvozku (tzv. „koliba“) k dalšímu zpracování. [4, 5, 18]

3.2 Chemické složení vysokopecní strusky

Základní chemické látky tvořící vysokopecní strusku jsou oxid vápenný (35 – 40 %), křemičitý (přibližně 40 %) a hlinitý (přibližně 10 %), tudíž se jedná o tříložkový systém,

nicméně se ve strusce vyskytuje také oxid hořečnatý (přibližně 10 %), který svou koncentrací u dnešních strusek často převyšuje oxid hlinitý. Při každém odpichu je proveden rozbor strusky s cílem stanovit množství těchto čtyř oxidů, na jehož základě se vypočítá zásaditost. Strusky ale samozřejmě obsahují celou řadu dalších doprovodných a stopových sloučenin a prvků. Výskyt a množství těchto doprovodných látek se liší v závislosti na druhu železné rudy, druhu a množství struskotvorných přísad, typu použitého paliva, druhu a stavu vyzdívky vysoké pece, konkrétním rozsahu a kolísání teploty při výpalu, viskozitě strusky a mnoha dalších faktorech. [4, 5, 18, 19]

Tabulka 2 Chemické složení vysokopecních strusek z hutí v České republice [19]

Prvek/ sloučenina	Procentuální hmotnost [%]	
	ArcelorMittal	Třinecké železářny
SiO ₂	37,9	39,2
CaO	36,5	40,7
MgO	13,1	10,5
Al ₂ O ₃	8,8	7,0
MnO	0,47	0,41
FeO	0,47	*
Fe	0,37	0,22
S	0,80	0,63
Mn	0,36	*
K ₂ O	0,52	0,52
TiO ₂	0,83	0,26
Na ₂ O	0,43	0,45
Cr	0,006	0,004
P	0,003	0,007
*	hodnota není k dispozici	

3.3 Možnosti úpravy a využití vysokopecní strusky

Ve chvíli, kdy je struska během odpichu oddělena od roztaveného železa, ztrácí svou primární funkci. V minulosti se stávala odpadem, dnes se již považuje za druhotnou surovinu. Pro použití ve stavebnictví je často nutné strusku dále upravovat, přičemž existuje hned několik možností těchto úprav.

3.3.1 Pomalu ochlazovaná struska

Jedná se o nejstarší způsob úpravy strusky. Metoda spočívá v pomalém ochlazení struskové taveniny v rozsáhlých jamách. Tavenina se ukládá po tenkých vrstvách, které jsou

zvolna ochlazovány vodou. Ve výsledné strusce převládají krystalické fáze a sklovité částice se vyskytují při porovnání s ostatními druhy strusky velice omezeně. Jakmile struska ztuhne a vykrytalizuje, je směs z jam mechanicky vytěžena a podrcena, konkrétně rozlišujeme dva druhy drcení. První možností je drcení pomocí ocelkové koule ovládané elektromagnetem a druhou, více používanou možností je pomocí čelistových a kuželových drtičů. Z podrcené strusky jsou pomocí magnetické separace odstraněny kusy surového železa z odpichu a samotná struska se dále drtí a dělí prosíváním na jednotlivé frakce. Takto upravená struska se může využívat jako kamenivo v zemních tělesech, nestmelených a zhutněných násypech. Nejběžnější využití je v silničním stavitelství, především v samotné konstrukci vozovky. Takové kamenivo je velmi žádané také do krytu vozovky především kvůli vysoké pevnosti a odolnosti proti obrusu a ohlazení. V případě našich dvou producentů železa u společnosti ArcelorMittal a Třinecké Železářny dochází útlumu výroby kameniva touto metodou. [3, 4, 6, 9, 11, 18, 19]

3.3.2 Granulovaná struska

Druhá, v dnešní době nejpoužívanější, metoda úpravy taveniny vysokopeční strusky se nazývá granulace. Na rozdíl od předchozí metody je proces ochlazení rychlý, tudíž nestačí dojít ke vzniku krystalických zárodků (v případě dopravy od pece do granulačního zařízení pomocí pánví vznikne jejich omezené množství na hladině taveniny) a ve strusce převládají díky sklotvornému oxidu SiO_2 skelné částice. Struska dovážená v pánvích má různou teplotu, obecně by ale nemělo dojít k poklesu pod 1350°C , vzhledem k době trvání odpichu ale část objemu strusky zkrystalizuje. Proto je vhodnější použít přímou granulaci, tj. metodu kdy se struska netransportuje pomocí pánví, ale přímo z vysoké pece odečte do granulačního zařízení, samotná granulace se dá provést dvěma odlišnými způsoby. [3, 9, 11, 18, 19]

a) Mokrý granulace

Jedná se o proces, kdy se roztavená struska pomalu vylévá do žlabu s velkým množstvím proudící vody. Horká tavenina dopadne na dno, roztříští se na drobné částice, které ztuhnou a jsou vodou odplaveny do usazovacích jímek. Druhou možností je, že se tavenina strusky vylévá přímo do uzavřené jímky, kde je vysokým proudem vstřikovávána voda, což způsobuje víření vody a rozmělnění taveniny na drobná zrna. Oba způsoby se používají při přímém granulování u vysoké pece a nejvýhodnější způsob je žlabová mokrá granulace. [3, 4, 9, 18]

b) Polosuchá granulace

Při této metodě se struska odlévá opět tenkým proudem do granulačního žlabu. Oproti mokré metodě je ale množství vody výrazně nižší a voda je přidávána pod tlakem 0,5 MPa, tudíž dojde pouze k částečnému ochlazení taveniny. Neztuhlé kousky strusky poté dopadají na lopatky rotačního bubnu, který je rozbíjí na drobné částice, a díky rychle proudícímu vzduchu zrna rychle vychladnou. Vzhledem k menšímu množství vody a tedy rychlejšímu sušení hotové granulované strusky se jedná o ekonomicky výhodnější metodu. [3, 4, 9, 18]

Výsledná zrna granulované strusky mají průměr 3-5 mm. Granulovanou strusku lze použít jako běžné kamenivo například v silničním stavitelství, nebo jako materiál pro výrobu tvarovek. Nejběžnější použití granulované strusky je však v cementářském průmyslu. Granulovaná struska se mele na vysokou jemnost a poté se používá buďto jako příměs do betonu, anebo přímo jako součást portlandských směsných cementů, vysokopecních cementů a směsných cementů. Jemně mletá sklovitá granulovaná vysokopecní struska má latentně hydraulické vlastnosti. Hydraulická reakce u strusky vznikne i s vodou, ale trvá velmi dlouho a výsledná pevnost je podprůměrná, ale v případě kontaktu se zásaditým prostředím (čerstvý beton) dochází k nárůstu pevnosti po několika dnech. Beton má také nižší hydratační teplo, což se projevuje na zmenšení možnosti vzniku trhlin během tvrdnutí betonu, což je ocenitelné především při betonáži v letních měsících. Na druhou stranu cementy s vysokým množstvím strusky nemohou být vyrobeny jako 42,5R a 52,5R, tedy se zrychleným nárůstem pevnosti. Z důvodu několikanásobně vyšší ceny granulované vysokopecní strusky před struskovým pomalu chladnoucím kamenivem v obou našich železárnách je granulace majoritním druhem úpravy strusky. [3, 4, 9, 18, 19, 20]

3.3.3 Konstrukční zpěněná struska

Další, v dnešní době ve vyspělých zemích již ojedinělá technologie je zpěňování strusky, někdy také označovaná jako peletizace. Oproti předchozí metodě je množství vody použité k úpravě strusky výrazně nižší. Tím dojde při kontaktu struskové taveniny s vodou k odpaření vody a vzniku páry, která uniká skrz taveninu a vytvoří rozsáhlou pórovitou strukturu. Ke vzniku pórů také přispívají plyny, které jsou ve strusce pohlceny z výroby železa. Samotná výroba se realizuje některou z následujících technologií. [1, 3, 9]

a) Písková zpěňovací pole

Jedná se o jednoduché jímky, jejichž dno je vyplněné pískem. Pod touto vrstvou se nachází přírodní potrubí s vodou používanou na chlazení, z kterého je písek zavlažován a zároveň písek slouží jako ochrana před roztavenou struskou. Jistou variantou jsou jímky, jejichž dno je tvořené mezerovitým betonem. Otevřená pórová struktura betonové desky tak zajistí rovnoměrnou distribuci chladicí kapaliny a přitom je zabráněno poškození armatur během odtěžování na rozdíl od pískového dna, kde k poškození poměrně často docházelo. U běžných pískových jam se proto později používalo chlazení shora, a aby bylo zajištěno, že voda projde skrz strusku, byla aplikace vody prováděna pomocí ponorného hydromonitoru. [1, 11]

b) Ocelové pánve

Druhá metoda, tedy zpěňování pomocí ocelových pánví, je vylepšení metody zpěňování pomocí pískových jímek. Strusková tavenina se rozlévá na ocelovou pánev, která má perforované dno, skrz které proudí chladicí kapalina. Na rozdíl od předchozí metody není na odtěžení zpěněné strusky nutná další mechanizace, protože pánve hotovou strusku vyklopí na dopravní pás. [1, 11]

c) Odstředivé zpěňování

Existují dvě možnosti odstředivého zpěňování. První možností je zařízení, kde rotují vodní trysky. Voda o vysokém tlaku se dostává do kontaktu s tenkým proudem struskové taveniny a struska je ještě v rozžhaveném stavu vymetena a tříští se o okolní stěny. Druhou možností je, že tenký proud strusky je ochlazován vodním paprskem a částečně ochlazená tavenina dopadá na rotující talíř, přičemž je dále postup již totožný s prvním způsobem. Strusková zrna z odstředivého zpěňování jsou velmi kvalitní, mají nízkou objemovou hmotnost a díky uzavřené pórové struktuře a téměř dokonalému kulovitému tvaru jsou vhodným kamenivem do lehkého betonu. [1, 11, 18]

d) Zpěňovací žlaby

Poslední možností je, že se struska z pánve vylévá přímo do uzavřeného žlabu. Zde je pod tlakem vháněna voda a vzduch tvořící vodní mlhu, která se dostává do kontaktu s taveninou a způsobuje zpěnění. Ještě nevychladlá částečně napěněná struska je pomocí tlaku

vody a vzduchu vymetena ze žlabu na pás, kde je dokončen proces zpěnění a struska vychladne. [1, 11, 18]

3.3.4 Lehká zpěněná struska

Druhá varianta zpěněné strusky se také nazývá termosit. V porovnání s předchozím typem má výrazně nižší pevnost v tlaku a mechanickou odolnost, jednotlivá zrna lze snadno drtit mezi prsty, avšak má lepší tepelně izolační vlastnosti. Také nasákavost termositu je velmi nízká, tudíž materiál dosahuje vysoké mrazuvzdornosti. Samotná výroba probíhá vypouštěním struskové taveniny do malého proudu tekoucí vody na žlabovém kole. Ze žlabového kola struska padá na síťový pás, kde pokračuje na skládku, zatímco voda propadne a na chladnutí strusky se už prakticky nepodílí. Poslední výroba termositu byla v naší zemi ve Vítkovických železárnách zastavena počátkem 80. let 20. století. [1, 11, 18]

3.3.5 Struskové izolace

Přetavením vychladlé vysokopecní strusky v rotační peci za současného přidání malého množství stabilizační přísady (apatitový koncentrát, nebo fosfátová struska) dostaneme materiál, který se velice podobná přírodnímu čediči. Z taveniny takto upravené strusky lze vyrábět vlákna na izolační materiály. Bohužel se tepelně izolační schopností nemohou rovnat s moderní skelnou nebo čedičovou vláknitou izolací, a proto se používají pouze v omezeném množství na izolace potrubí, transportující medium o vysoké teplotě.

Stádium procesu ¹⁾	Opatření na ovlivnění kvality	Ovlivněné vlastnosti
Příprava surovin	výběr, příprava, předběžné zpracování surovin týkající se chemického složení vysokopecní strusky	chemické složení např. CaO SiO ₂ Al ₂ O ₃ MgO alkálie
Proces tavení	výběr vhodných podmínek procesu (teplota pece, snížení poměru uhlíku, tok plynu)	teplota, složení výrobků
Tepelné zpracování	různé rychlosti chlazení: a) rychlé - foukání - granulace - peletizace	obsah skloviny struktura mezerovitost
	b) střední - pění	objemová hmotnost pevnost mezerovitost
	c) pomalé - chlazení vzduchem	pevnost, mezerovitost odolnost proti otěru velikost zrn
Zpracování	drcení, prosévání, třídění, mletí	velikost zrn tvar zrnitost

¹⁾ Veškerá stadia procesu jsou předmětem trvalého řízení výroby, jako je odběr vzorků, fyzikální/chemická analýza a zkoušení.

Obrázek 4 - Přehled základních možností úpravy vysokopecní strusky [21]

4 Objemové změny vysokopecních strusek

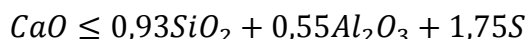
Objemové změny jsou v dnešní době považovány za jeden z největších problémů v případě využití struskového kameniva, a to nejen ve spojení s nechvalně proslulou dálnicí D47. Obecně jsou objemové změny největší u frakcí struskového kameniva pod 4 mm, protože mají mnohem větší měrný povrch, kde může k reakcím docházet. Náchylnost strusek na objemové změny a rozpad se stanovuje zkouškou rozpadavosti v autoklávu, kde by u testovaného kameniva nemělo dojít k úbytku hmotnosti o více než 5 %. [1, 8, 22]

4.1 Rozpad strusky

a) Silikátový rozpad

Jedná se o nejčastější druh rozpadu, hlavně u krystalických strusek, kdy dochází ke změně β -C₂S na γ -C₂S. Tento proces může vzniknout jednak během výroby při poklesu teploty pod 675 °C, ale především u strusky zabudované v konstrukci i po několika letech. Nově vzniklý γ -C₂S má nižší objemovou hmotnost a nárůst objemu je mezi 9 až 10 %. Na silikátový rozpad jsou obzvlášť náchylné strusky velmi zásadité s obsahem CaO více než 46 %, vznik je všem ovlivněn i přítomností oxidu hlinitého a fosforečného (Al₂O₃ a P₄O₁₀). Ke stabilizaci β -C₂S se také někdy používá oxid chromitý (Cr₂O₃). Obecně se předpokládá vznik silikátového rozpadu v případě, že není splněna ani jedna následující podmínka. [1, 8, 22]

Rovnice vzniku silikátového rozpadu [1]:



b) Železnatý a manganatý rozpad

Železnatý rozpad strusky způsobuje sulfid železnatý (FeS), který je ve strusce obsažen z výroby. V případě zvýšené vlhkosti může dojít k oxidaci jak u sulfidické síry, tak i u železitě části (Fe⁺² na Fe⁺³). Společné působení těchto prvků umožňuje vznik síranu železnatého a železitého (FeSO₄ a Fe(SO₄)₃). Dále probíhá hydrolýza (tj. chemická reakce, u které se spotřebovává voda), což má za následek růst objemu o až 40 %. [8, 19, 22]

Manganatý rozpad je velice podobný železnatému rozpadu. Sulfid manganatý (MnS) se díky okolnímu prostředí mění na hydroxid manganatý (Mn(OH)_2). Opět dojde ke zvětšení objemu, což může vést až k úplnému rozpadu strusky. [8, 22]

Železnatý i manganatý rozpad nastává pouze výjimečně, především je-li obsah oxidu železnatého (FeO) větší než 3 % a obsah síry více než 1 %. Především síra je při vysokopecním procesu vázaná jako sulfid vápenatý (CaS). [1]

4.2 Studený odval

V podstatě všechny problémy spojované se struskou na již zmíněné dálnici D47, případně na prodejně Mountfield nebo části obchodního centra Avion ShoppingPark a mnoha dalších stavbách jsou spojeny s odvalem. Je nesprávné tento materiál spojovat se současnou produkcí strusky. Odval je vedlejší produkt hutní výroby nacházející se nejčastěji v okolí hutních závodů. Odpadní produkty z výroby se na něj ukládaly v dobách, kdy se s dalším využitím strusek nepočítalo (mimo magnetické separace kovových částic). Konkrétně se jedná o směs mnoha druhů materiálů, která samozřejmě obsahuje v podstatném měřítku ocelářskou a vysokopecní strusku. Poměr těchto strusek se i jako jejich aktuální stav na konkrétním odvalu značně liší místo od místa. Dále na odvalech nalezneme žáruvzdorné písky, části šamotových cihel z vyzdívek pece, zbytky kovového podílu a mnoho dalších materiálů včetně plastu nebo dřeva. Česká republika je jediná země na světě, kde byl tento materiál použit na stavbu významné strategické dopravní komunikace. Obecné využití odvalu jako stavebního materiálu je vhodné maximálně na pořadné a málo významné stavby (lesní cesty). [3, 8].

5 Popis vzorků struskového kameniva

Cílem této bakalářské práce je stanovit vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti struskového kameniva a následné porovnání těchto hodnot s technickým listem (a jinou dokumentací) materiálu. Na základě dosažených hodnot bude v závěru práce zhodnocena možnost použití tohoto kameniva ve směsích stmelených hydraulickými pojivy.

5.1 Dodavatel kameniva

Kamenivo pochází od firmy Destro s.r.o., kde byly vzorky odebrány z běžné produkce kameniva určené pro využití v betonářském průmyslu. Firma Destro s.r.o. se nachází v Kladně, její třídící linky stojí v prostorách bývalé haldy kladenských hutí. Mimo zpracování vysokopecní strusky se firma Destro s.r.o. zabývá rovněž zpracováním ostatního hutního odpadu (ocelářských strusek, ocelových slitků, žáruvzdorných materiálů z vyzdívek pecí) a v neposlední řadě zpracováním betonového, asfaltového a cihelného recyklátu. [23]

Samotná firma vznikla v roce 1991 pod názvem Miroslav Karas – Destro a specializovala se na zpracování především ocelářenské strusky z kladenské ocelárny Poldi. V roce 1994 se firma stává společností s ručením omezeným a začíná zpracovávat odpady většiny producentů hutního průmyslu v okolí. V roce 1997 firma rozšiřuje své portfolio o zpracování stavební suti z bouracích prací a v roce 1998 získává povolení na odtěžení a zpracování materiálu z kladenské haldy Koňev, která tvoří dodnes hlavní zdroj materiálu. [23]

5.2 Popis kameniva

Konkrétní kamenivo je zastoupeno třemi frakcemi (0 - 4, 4 - 8, 8 - 16) mm, které jsou při výrobě betonových a jiných hydraulicky stmelených směsí používány nejčastěji. Firma Destro s.r.o. odtěžuje kamenivo z bývalé haldy, v okolí má několik třídících a drtících linek. [23]

Samotné kamenivo se těží nakladači a pomocí nákladních vozidel a dumperů se dopravuje k násypce do třídící linky. Destro s.r.o. používá třídící a drtící linku Powerscreen Chieftain 1400. Po prvotním předběžném hrubém třízení prochází kamenivo čelistovým a kulovým drtičem. Po každém drcení se navíc provádí magnetická separace kovových částic. Takto upravené kamenivo prochází přes sérii třídičů a je rozděleno do frakcí (63 - 125, 22 -

63, 8 - 22, 2 - 8 a 0 - 4/0 - 2) mm. Pro betonářské účely se vhodné frakce z předchozího výčtu znova třídí na další lince na (8 - 16, 4 - 8 a 0 - 4) mm. Podrobná schémata třídících linek se nachází v přílohách č. 1 a 2. [23]



Obrázek 5 - Struskové kamenivo DESTRO frakce 8 - 16 mm



Obrázek 6 - Struskové kamenivo DESTRO frakce 4 - 8 mm

6 Ověření mechanických a fyzikálních vlastností

6.1 Zrnitost

Zrnitost je jeden z nejzákladnějších parametrů pro kamenivo použité v betonových směsích. Stanovuje se sítovým rozborem, jehož výsledky tvoří křivku zrnitosti. Ta by měla mít rovnoměrný průběh zaručující neoptimálnější složení. V betonu se požaduje, aby prostor mezi největšími zrny byl vyplněn zrny menšími až do filerových částic. Tím dostaneme z ekonomického hlediska ideální stav, protože zredukujeme množství cementového tmelu, který vyplňuje prostor mezi zrny a je nejdražší položkou, na nutné minimum. Rovněž kamenivo má větší pevnost než cementový tmel, tudíž se optimální zrnitost podstatně projevuje na výsledné celkové pevnosti betonu. [20]

6.1.1 Postup stanovení zrnitosti kameniva

Postup pro stanovení křivky zrnitosti je dán normou ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. [25] Kamenivo se musí proprat přes síto 0,063 mm, nad které se umístí odlehčovací síto 1 mm, poté se umístí do sušárny na teplotu 110 ± 5 °C na 24 h (až do ustálené hmotnosti) a samotný rozbor se provádí až na vysušeném kamenivu. Vzhledem k druhu kameniva a úzké frakci při zkouškách nebylo propírání aplikováno a kamenivo se rovnou umístilo do soustavy sít. Před samotným rozborem se síta seřadí od největší po nejmenší. Pro měření byla použita normová základní sada sít (31,5; 16; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063) mm včetně vrchního krytu a spodního uzavřeného dílu. Vzorek kameniva se vsype, síta se pomocí uzávěru a víka uzavřou a zapne se vibrační stolec. Vzhledem k úzké frakci kameniva je potřeba dát pozor na přetížení síta, a proto se doporučuje navážku prosévat na více částí. Vzhledem k tomu, že při snížení amplitudy na minimum nedošlo k prosetí všech zrn, ale docházelo k obrušování a drcení, kdy především ostrohranná tvrdá strusková zrna drtila cihelnou a šamotovou drť, bylo prosévání řešeno pomocí ručního střásání. [25]

Výpočet maximálního zatížení síta (1) [25] :

$$Max. \text{ zatížení síta} = \frac{A * \sqrt{d}}{200} \quad (1)$$

Kde:

A je plocha síta [mm²],

d je velikost otvoru síta [mm].

Po samotném prosévání se zváží zůstatek na síti, postupujeme od horního síta k dolnímu, přičemž se zaznamenává hodnota pro každé síto. Na závěr se stanoví podíl jemných částí a také ztráta vzorku, která nesmí překročit 1 %, jinak je zkouška neplatná. Podíl jemných částic se stanovuje z procenta, které propadlo nejmenším sítem (0,063 mm) podle normy ČSN EN 13424+A1 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace. [27]



Obrázek 7 - Část sady normových sít

6.1.2 Zrnitost struskového kameniva

Dle normy bylo na základě minimálního množství zvoleno optimální množství kameniva pro zkoušku. Porovnání všech navážek se nachází v tabulce č. 3, včetně stavu navážky po zkoušce a výpočtu ztráty hmotnosti vzorku během zkoušky. Křivky zrnitosti jsou vyobrazeny v grafu (obr. č. 8).

Tabulka 3 - Vstupní navážky kameniva pro síťový rozbor

Frakce kameniva [mm]	Vstupní navážka [g]	Stav navážky po síťovém rozboru [g]	Hmotnostní úbytek [g]	Procentuální úbytek [%]
8 - 16	3003,9	3000,3	3,6	0,1
4 - 8	600,1	599,6	0,5	0,1
0 - 4	399,9	399,0	0,9	0,2

Dále se nachází v tabulce č. 4; 5; 6 nachází hodnoty síťového rozboru pro každou frakci zvlášť a graf křivky zrnitosti.

Tabulka 4 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 8 - 16 mm

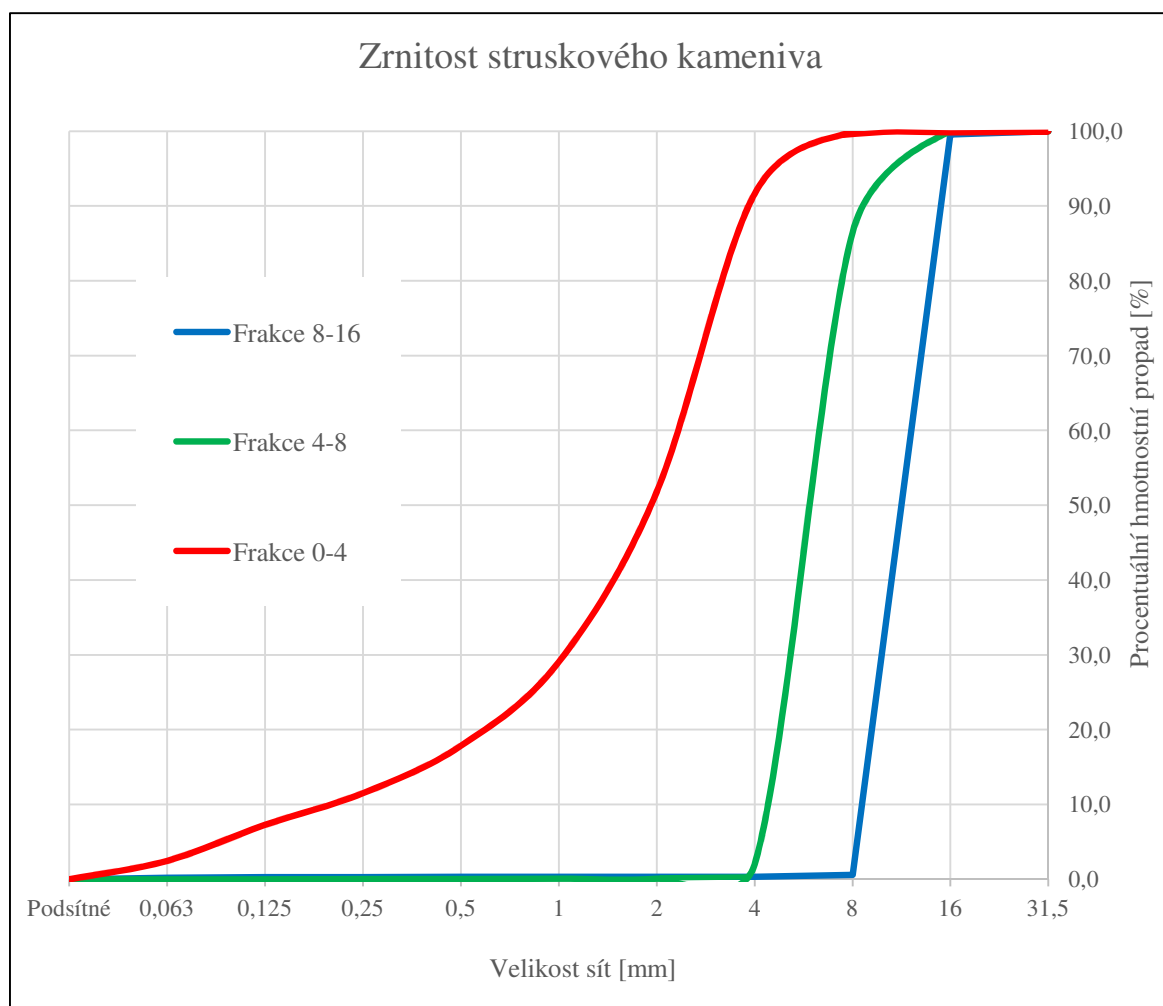
Frakce 8 - 16 mm			
Síto [mm]	Hmotnostní zůstatek [g]	Procentuální zůstatek [%]	Procentuální propad [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
16	13,8	0,5	99,5
8	2969,4	99,0	0,6
4	6,9	0,2	0,3
2	0,0	0,0	0,3
1	0,3	0,0	0,3
0,5	0,6	0,0	0,3
0,25	0,6	0,0	0,3
0,125	0,6	0,0	0,3
0,063	2,4	0,1	0,2
Podsítné	5,7	0,2	0,0
Součet	3000,3		

Tabulka 5 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 4 - 8 mm

Frakce 4 - 8 mm			
Síto [mm]	Hmotnostní zůstatek [g]	Procentuální zůstatek [%]	Procentuální propad [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	81,5	13,6	86,4
4	506,5	84,5	1,9
2	11,2	1,9	0,1
1	0,1	0,0	0,1
0,5	0,2	0,0	0,0
0,25	0,1	0,0	0,0
0,125	0,1	0,0	0,0
0,063	0,0	0,0	0,0
Podsítné	0,0	0,0	0,0
Součet	599,6		

Tabulka 6 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 0 - 4 mm

Frakce 0 - 4 mm			
Síto [mm]	Hmotnostní zůstatek [g]	Procentuální zůstatek [%]	Procentuální propad [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	0,3	0,1	99,9
4	33,1	8,3	91,6
2	159,0	39,9	51,8
1	90,6	22,7	29,1
0,5	44,8	11,2	17,8
0,25	25,2	6,3	11,5
0,125	16,9	4,2	7,3
0,063	19,2	4,8	2,5
Podsítné	9,8	2,5	0,0
Součet	399,0		



Obrázek 8 - Porovnání zrnitostí jednotlivých frakcí

Tabulka 7 - Stanovení obsahu jemných částic

Frakce kameniva [mm]	Procento jemných částic [%]	Druh kameniva	Kategorie dle ČSN EN 13242+A1
8 - 16	0,2	hrubé	f ₂
4 - 8	0,0	hrubé	f ₂
0 - 4	2,5	drobné	f ₃

Zrnitosti odpovídají parametrům frakce udávané výrobcem. Obsah jemnozrnných částic (propad sítem 0,063 mm) je dle normy ČSN EN 13242+A1 pro hrubé frakce v kategorii f₂ a pro hrubé kamenivo v kategorii f₃, tedy ve všech případech v nejnižší hodnotě pro daný druh kameniva.

6.2 Tvarový index

Tvarový index udává poměr stran zrn kameniva. Pro použití v betonech a ostatních hydraulických stmelovaných směsích je z tvarového hlediska nejvhodnější použít zrna kulová. Naopak různé jehličky a destičky, kde rozměr nejdelší strany je několikanásobkem rozměru nejkratší stěny, jsou velmi nevhodná, protože při zatížení může dojít k usmýknutí, a tedy porušení betonu i při menší hodnotě síly než je odpovídající hodnota pevnosti. Nevhodný tvar zrn se rovněž podílí na vzniku šterkových hnízd.[20]

6.2.1 Postup stanovení tvarového indexu

Zkouška probíhala dle normy ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index. [26]Jednotlivé navážky byly připraveny kvartací většího množství kameniva, minimální množství kameniva pro zkoušku je 1 kg pro frakci (8 - 16) mm a 0,1 kg pro frakci (4 - 8) mm. Pro frakci (0 - 4) mm se zkouška neprovádí. Vzhledem k přesnému rozdělení na frakce opět nebylo provedeno promývání a rovnou bylo provedeno měření. Samotné měření se provádí pomocí dvoučelistového měřidla na každém zrně zvlášť a podle výsledků se zrna rozděluje na kubická (mají poměr největší a nejmenší strany menší než 3) a nekubická (poměr stran větší než 3). Tvarový index se vypočte z podílu hmotnosti nekubických zrn k celkové hmotnosti zrn. [26]

Výpočet tvarového indexu (2) [26] :

$$SI = \frac{m_2}{m_1} \times 100 [-] \quad (2)$$

Kde:

SI – tvarový index,

m_1 – hmotnost celé navážky [g],

m_2 - hmotnost nekubických zrn [g].



Obrázek 9 - Dvoučelistové měřidlo, určené pro stanovení tvarového indexu

6.2.2 Tvarový index struskového kameniva

Výsledný tvarový index pro jednotlivé frakce kameniva se nachází v tabulce č. 8.

Tabulka 8 - Stanovení tvarového indexu SI pro jednotlivé frakce kameniva

Frakce kameniva [mm]	Zkušební navážka m_1 [g]	Kubická zrna m_2 [g]	Nekubická zrna [g]	Tvarový index SI
8 - 16	1330,3	1287,2	43,1	3
4 - 8	121,0	116,2	4,8	4
0 - 4				

Přihlédneme-li k tomu, že kamenivo prochází dvojitým procesem drcení, je tvar zrn odpovídající drtivě převaze kubických zcela na místě. Výrobce udává hodnotu tvarového indexu 8,9 pro frakci (8 - 22) mm a 3,9 pro frakci (2 - 8) mm, tedy naměřené hodnoty jsou menší než hodnoty výrobce.

6.3 Měrná hmotnost fileru

Měrná hmotnost udává hmotnost materiálu bez pórů a mezer. Vzhledem k tomu, že je struskové kamenivo pórovité, je získání hodnoty měrné hmotnosti pouze mezikrokem pro další výpočty.

6.3.1 Postup stanovení měrné hmotnosti

Měrná hmotnost fileru se stanovuje podle normy ČSN EN 1097-7 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška. [29] Pyknometr je nádoba o známém objemu, která má speciální uzávěr s kapilární dutinou, jenž je zabroušen přesně na hrdlo konkrétního pyknometru. Samotná zkouška spočívá v nahrazení vody v pyknometru za materiál, a pokud zjistíme hmotnost navážky i pyknometru a hustotu kapaliny, jsme schopni dopočítat hustotu materiálu. Před samotnou zkouškou je nutné struskové kamenivo pomlít ve vibračním mlýnu a pomletý materiál prosít přes síto 0,125 mm, přičemž se při zkoušce použije pouze podsítná frakce. [29]

Zkušební navážka o hmotnosti minimálně 50 g vysušená v sušárně na 110 ± 5 °C po dobu 24 h do ustálené hmotnosti se vyjme a nechá vychladnout v exikátoru se silikagelem. Samotná zkouška se provádí ve třech pyknometrech. Nejprve se zváží prázdný pyknometr včetně zátky (m_0), poté se pyknometr naplní pomletým materiálem o hmotnosti 10 ± 1 g a zváží se znovu (m_1). Následně se pyknometr naplní demineralizovanou vodou tak, aby vzorek byl zcela ponořen, a uzavře se zátkou. Plnění musí být pomalé, aby nedošlo k úletu jemných zrn. Pyknometr se umístí do vakuového exikátoru po dobu 30 minut s tlakem menším než 3,0 kPa. Následně se pyknometr vyjme, odzátkuje, naplní demineralizovanou vodou po okraj a umístí na 60 minut do vodní lázně o teplotě $25 \pm 0,1$ °C. Poté se pyknometr zazátkuje a ochladí pod studenou tekoucí vodou, povrch pyknometru se osuší a celý pyknometr s vodou i materiálem se zváží (m_2). Pro zjištění hustoty demineralizované vody se pyknometr vymyje a naplní pouze demineralizovanou vodou a zváží (m_3). Veškeré vážení probíhá s přesností na 0,001 g. [29]

Výpočet měrné hmotnosti pyknometrem (3) a výpočet hustoty kapaliny (4) [29]:

$$\rho = \frac{(m_1 - m_0)}{V - \frac{(m_2 - m_0)}{\rho_v}} [Mg.m^{-3}] \quad (3)$$

$$\rho_v = \frac{(m_3 - m_0)}{V} [Mg.m^{-3}] \quad (4)$$

Kde:

ρ – měrná hmotnost kameniva [$Mg.m^{-3}$],

m_0 – hmotnost prázdného pyknometru [g],

m_1 – hmotnost pyknometru s filerem [g],

m_2 – hmotnost pyknometru s filerem a vodou [g],

m_3 – hmotnost pyknometru s vodou [g],

V – objem pyknometru [50 ml],

ρ_v – hustota vody [$Mg.m^{-3}$].



Obrázek 10 - Pyknometr uzavřený zbroušenou zátkou



Obrázek 11 - Mlecí nádoba vibračního mlýnu

6.3.2 Měrná hmotnost struskového fileru

Výsledné měrné hmotnosti ze všech tří pyknometrů jsou v tabulce č. 9.

Tabulka 9 - Měrná hmotnost strusky stanovena pyknometricky.

Číslo pyk.	Hmotnost m_0 [g]	Hmotnost m_1 [g]	Hmotnost m_2 [g]	Hmotnost m_3 [g]	Měrná hmotnost vody ρ_w [Mg.m ⁻³]	Měrná hmotnost fileru ρ [Mg.m ⁻³]
1	24,837	34,850	80,958	74,244	0,99	2,92
2	24,808	34,864	82,074	74,962	1,01	3,09
3	26,821	36,839	82,539	75,647	0,98	2,98
Průměrná měrná hmotnost [Mg.m ⁻³]						2,99

Hodnota měrné hmotnosti byla stanovena ve třech pyknometrech. Průměrná měrná hmotnost strusky je 2,99 Mg.m⁻³, což odpovídá tabulkové hodnotě pro struskové kamenivo.

6.4 Objemová hmotnost v odměrném válci

V současných normách pro kamenivo se zkouška stanovení objemové hmotnosti pomocí odměřeného válce na rozdíl od minulosti již nevyskytuje. Nicméně pro svoji jednoduchost, rychlost a vzhledem k zaokrouhlování objemové hmotnosti na desítky kilogramů na m³ i dostatečnou přesnost je stále oblíbená.

6.4.1 Postup stanovení objemové hmotnosti

Předem vysušené kamenivo do ustálené hmotnosti (teplota 110 ± 5 °C po dobu 24h) se vyjme z pece, nechá se vychladnout a zváží se. Odměrný válec se naplní do poloviny vodou a odečte se hodnota objemu. Do válce se vloží ocelová míchací tyčinka a nasype se kamenivo. Mícháním dojde k odstranění vzduchových bublin ze spodní strany zrn kameniva. Následně po vyjmutí tyčinky se odečte hodnota objemu vody a kameniva. Z obou hodnot objemu a hmotnosti lze dopočítat objemovou hmotnost.

Výpočet objemové hmotnosti pomocí odměrného válce:

$$\rho_v = \frac{m}{(V_2 - V_1)} [Mg.m^{-3}]$$

Kde:

ρ_v – objemová hmotnost kameniva [Mg.m⁻³],

m – hmotnost kameniva [g],

V₁ – objem vody [ml],

V₂ – objem vody a kameniva [ml].

6.4.2 Objemová hmotnost kameniva stanovená v odměrném válci

Zkouška byla provedena na všech třech frakcích. Výsledky objemové hmotnosti měřené pomocí odměrného válce jsou v tabulce č. 10.

Tabulka 10 - Objemová hmotnost kameniva stanovená pomocí odměrného válce

Frakce kameniva [mm]	Zkušební navážka m [g]	Objem vody ve válci V ₀ [ml]	Objem vody a kameniva ve válci V ₁ [ml]	Objemová hmotnost kameniva ρ_v [Mg.m ⁻³]
8 - 16	250,9	500	595	2,51
4 - 8	250,1	500	600	2,50
0 - 4	249,9	500	600	2,50

Při porovnání s údaji od výrobce vychází naměřené hodnoty pouze o 50 kg.m^{-3} větší, rozdíl může být způsoben nepřesností metody měření objemové hmotnosti pomocí odměrného válce.

6.5 Objemová hmotnost stanovená pyknometricky a pórovitost

Jedná se o další a přesnější možnost jak stanovit objemovou hmotnost, a to použitím pyknometru.

6.5.1 Postup stanovení objemové hmotnosti a pórovitosti

Objemová hmotnost pomocí pyknometru se stanovuje podle normy ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [31] Z důvodu absence dostatečně velkého pyknometru v laboratoři byla namísto pyknometru použita ocelová nádoba s ryskou a kvůli zvýšení přesnosti byla zkouška provedena opakovaně 3x a jako výsledek byla použita střední hodnota. Taktéž některé další kroky jak v přípravě, tak i v měření samotném se odchylovaly od normových podkladů. Před samotnou zkouškou se připraví množství kameniva (pro frakci 8 - 16 mm více než 1000g, pro frakci 4 - 8 mm více než 500g). Před samotnou zkouškou se vzorky zcela ponoří na minimálně 24 h do vody (do ustálené hmotnosti). Před zkouškou se vyjmou, rozprostrou na utěrku a povrchově usuší a zvážení se získá hmotnost povrchově osušeného kameniva (m_a). Kamenivo se umístí do pyknometru, kde se zaleje vodou až po rysku. Promícháním se odstraní vzduch a zvážení se získá hmotnost kameniva, vody a pyknometru (m_b). Z pyknometru se vyjme kamenivo, a doleje se voda tak, aby opět hladina sahala až po rysku, a zvážení se získá hmotnost pyknometru a vody (m_c). Kamenivo se vysuší v sušárně do ustálené hmotnosti (po dobu 24 h při teplotě $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a zvážení se získá hmotnost vysušeného kameniva (m_d). Z těchto údajů lze dopočítat objemovou hmotnost a známe-li i měrnou hmotnost kameniva, je možné dopočítat i pórovitost, tedy objem pórů zrn kameniva. [31]

Výpočet objemové hmotnosti vysušeného kameniva (5) [31]:

$$\rho_v = \frac{m_d}{m_a - (m_b - m_c)} \cdot \rho_w \text{ [Mg.m}^{-3}\text{]} \quad (5)$$

Kde:

m_a – hmotnost povrchově osušeného kameniva [g],

m_b – hmotnost pyknometru, kameniva a vody [g],

m_c – hmotnost pyknometru a vody [g],

m_d – hmotnost vysušeného kameniva [g],

ρ_w – objemová hmotnost vody [Mg.m⁻³].

Objemová hmotnost se zaokrouhluje na desetiny Mg.m⁻³.

Výpočet pórovitosti:

$$p = \frac{\rho - \rho_d}{\rho} \cdot 100[\%]$$

ρ – měrná hmotnost kameniva [Mg.m⁻³]

ρ_v – objemová hmotnost kameniva [Mg.m⁻³]

6.5.2 Objemová hmotnost struskového kameniva - pyknometricky

Zkouška byla provedena celkem třikrát pro každou z posuzovaných frakcí (8 - 16 mm a 4 - 8 mm, na frakci 0 - 4 mm zkouška provedena nebyla). Výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 11 a 12.

Tabulka 11 - Objemová hmotnost kameniva stanovená pyknometricky

Frakce kameniva [mm]	Hmotnost povrchově osušené navážky [g]	Hmotnost pyknometru, kameniva a vody [g]	Hmotnost pyknometru a vody [g]	Hmotnost vysušeného kameniva [g]	Objemová hm. kameniva [Mg.m ⁻³]
8 - 16	1045,0	10754,0	10123,5	1005,0	2,42
		10748,0	10121,5		2,40
		10753,0	10119,5		2,44
4 - 8	525,0	10426,0	10107,5	498,5	2,41
		10431,5	10114,5		2,40
		10435,5	10112,0		2,47

Tabulka 12 - Průměrné hodnoty objemové hmotnosti

Frakce kameniva [mm]	Objemová hmotnost - pyknometricky [Mg.m ⁻³]
8 - 16	2,42
4 - 8	2,43

Dále byla dopočtena pórovitost frakcí kameniva 8 - 16 mm a 4 - 8 mm, zobrazená v tabulce č. 13.

Tabulka 13 - Stanovená pórovitost struskového kameniva

Frakce kameniva [mm]	Měrná hmotnost [Mg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [Mg.m ⁻³]	Pórovitost [%]
8 - 16	2,99	2,42	19,1
4 - 8	2,99	2,43	18,7

Objemová hmotnost stanovená výrobcem je 2,40 Mg.m⁻³ pro frakci 8 - 16 mm respektive 2,44 Mg.m⁻³ pro frakci 4 - 8 mm. Tyto hodnoty se prakticky shodují s laboratorně stanovenou objemovou hmotností. Pórovitost byla vypočtena pro obě kameniva 19,1 resp. 18,7 %, výrobce údaje o pórovitosti neposkytuje.

6.6 Sypaná hmotnost volně sypaná a setřesená, mezerovitost

Sypná hmotnost je podstatná vlastnost kameniva a i dalších drobných kusových materiálů využitých pro stavební účely. Ve stavební praxi se sypná hmotnost rozděluje na sypnou hmotnost volně sypanou a sypnou hmotnost v setřeseném (zhutněném) stavu.

6.6.1 Postup stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti

Sypná hmotnost se stanovuje podle normy ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. [30] Zkouška se provádí na třech dílčích navážkách a výsledná hodnota se získá zprůměrováním. Navážka se odebere ze zdroje vzorku pomocí kvartace a vysuší se do ustálené hmotnosti (při teplotě 110 ± 5 °C po dobu 24 h). U nádoby o známém objemu (dle normy pro frakci 0 - 4 mm o objemu 1 l a pro frakci 4 - 8 mm a 8 - 16 mm o objemu 5 l) se zjistí její hmotnost (m_a). Nádoba se naplní kamenivem až po okraj. Samotné plnění musí

probíhat opatrně, aby nedošlo k hutnění kameniva, lopatka se musí nacházet maximálně 50 mm nad hladinou kameniva, avšak se zároveň nesmí dotýkat kameniva samotného. Po doplnění se u drobné frakce povrch opatrně zarovná pomocí pravítka, u frakcí 4 - 8 mm a 8 – 16 mm se manuálně urovná do přibližné roviny a zvážení získáme hmotnost (m_b). Postup opakujeme u všech navážek. Z těchto výsledků jsme schopni dopočítat sypanou hmotnost, a pokud známe i objemovou hmotnost, tak jsme schopni vypočítat i mezerovitost. [30]

Co se týče sypané hmotnosti v setřeseném stavu, ta není v současných normových podkladech popsána. Samotná zkouška se však liší pouze v tom, že plnění nádoby o známém objemu kamenivem se provádí na zapnuté vibrační podložce a plnění je prováděno opět po hranu nádoby. Jakmile se i přes vibraci kamenivo již nehutní, nádoba se odejme z vibračního stolce a zarovnání povrchu probíhá totožně s postupem stanovení sypané hmotnosti volně sypané.

Výpočet sypané hmotnosti (6) [30]:

$$\rho_b = \frac{m_b - m_a}{V} [Mg.m^{-3}] \quad (6)$$

Kde:

ρ_b – sypaná hmotnost kameniva [$Mg.m^{-3}$],

V – objem nádoby [ml],

m_a – hmotnost prázdné nádoby [g],

m_b – hmotnost nádoby s kamenivem [g].

Výpočet mezerovitosti (7) [30]:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \cdot 100[\%] \quad (7)$$

Kde:

ρ_b – sypaná hmotnost kameniva – volně sypaná [$Mg.m^{-3}$],

ρ_v – objemová hmotnost kameniva (vysušeného) [$Mg.m^{-3}$].



Obrázek 12 - Zkušební nádoba o objemu 5 l



Obrázek 13 - Zkušební nádoba o objemu 1 l

6.6.2 Sypná hmotnost struskového kameniva

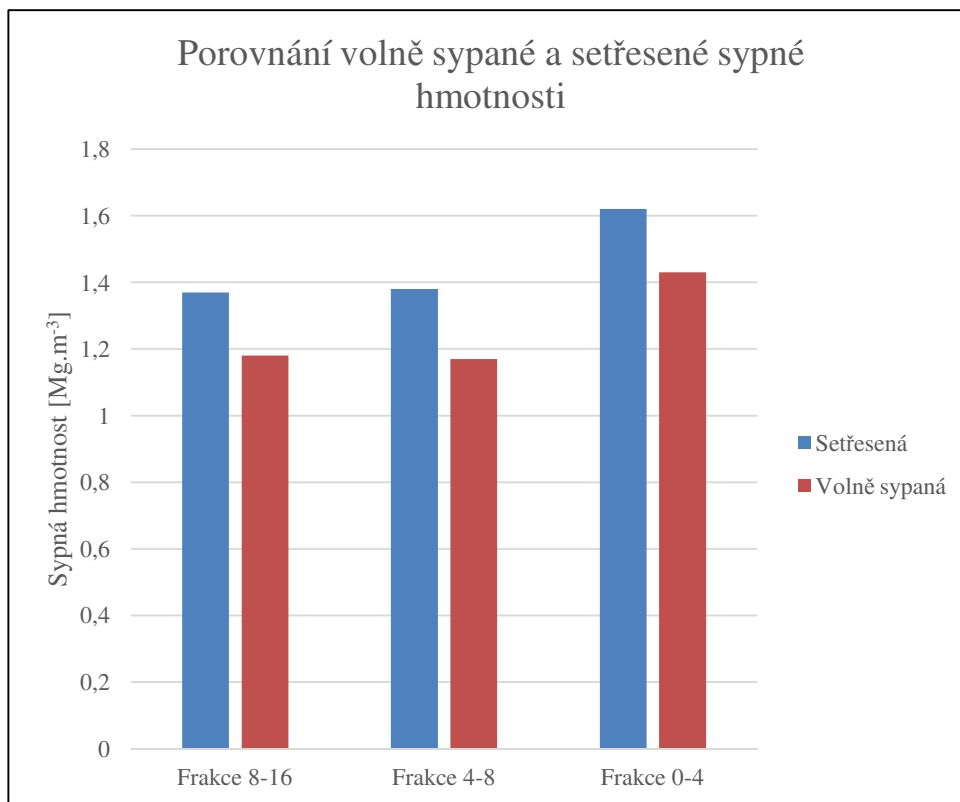
Výsledná sypná hmotnost volně sypaná i v setřeseném stavu je uvedena v tabulce č. 14, dále se v tabulce č. 15 nachází porovnání průměrných hodnot sypné hmotnosti pro jednotlivé frakce, které je zobrazeno i v grafu (obr. č. 14).

Tabulka 14 - Hodnoty sypné hmotnosti volně sypané i v setřeseném stavu.

Frakce kameniva [mm]	Objem nádoby [ml]	Navážka volně sypaná [g]	Volně sypaná sypná hmotnost [Mg.m ⁻³]	Setřesená navážka [g]	Setřesená sypná hmotnost [Mg.m ⁻³]
8 - 16	5000	6008	1,20	6853	1,37
		5896	1,18	6930	1,39
		5877	1,17	6789	1,36
4 - 8	5000	5862	1,17	6790	1,36
		5917	1,18	6947	1,39
		5748	1,15	6982	1,40
0 - 4	1000	1410,7	1,41	1645,9	1,65
		1395,3	1,40	1568,4	1,57
		1467,0	1,47	1632,8	1,63

Tabulka 15 - Průměrné sypné hmotnosti pro jednotlivé frakce

Frakce kameniva [mm]	Volně sypaná sypná hmotnost ρ_b [Mg.m ⁻³]	Setřesená sypná hmotnost ρ_{bs} [Mg.m ⁻³]
8 - 16	1,18	1,37
4 - 8	1,17	1,38
0 - 4	1,43	1,62



Obrázek 14 - Porovnání volně sypané a setřesené sypné hmotnosti

Dále z naměřených hodnot byla dopočtena mezerovitost, výsledky jsou v tabulce č. 16.

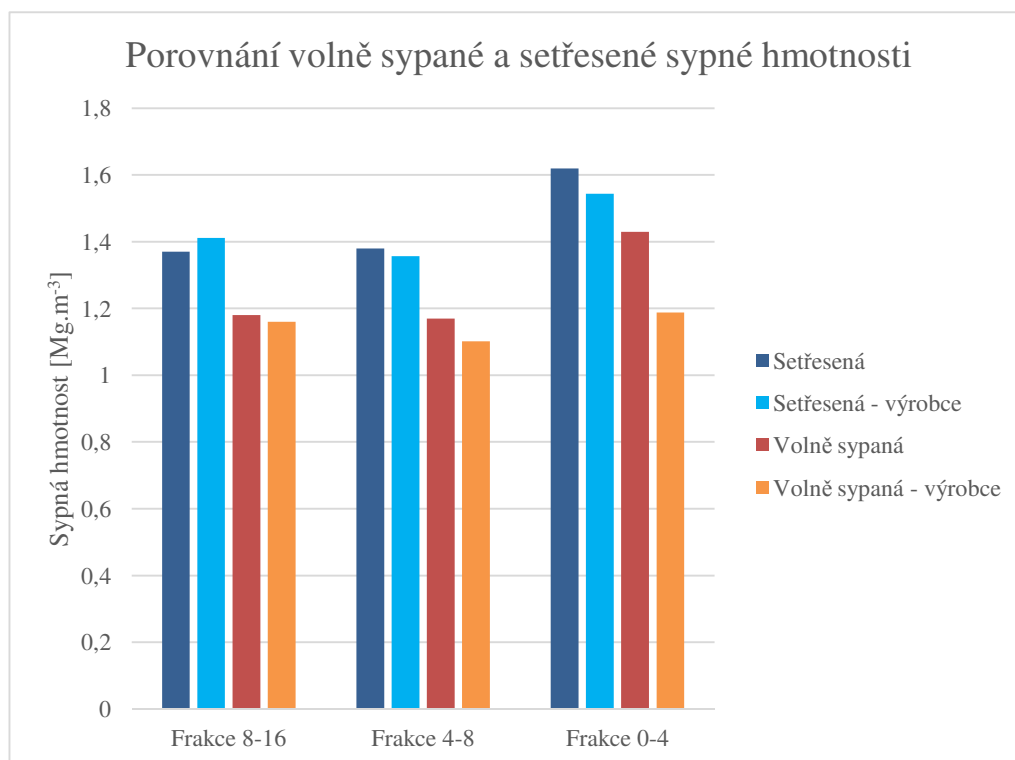
Tabulka 16 - Mezerovitost struskového kameniva

Frakce kameniva [mm]	Objemová hmotnost ρ_v [Mg.m ⁻³]	Volně sypaná sypná hmotnost ρ_b [Mg.m ⁻³]	Mezerovitost - volně sypaná [%]	Setřesená sypná hmotnost ρ_{bs} [Mg.m ⁻³]	Mezerovitost - setřesená [%]
8 - 16	2,42	1,18	51,2	1,37	43,4
4 - 8	2,43	1,17	51,9	1,38	43,2
0 - 4	2,50	1,43	42,8	1,62	35,2

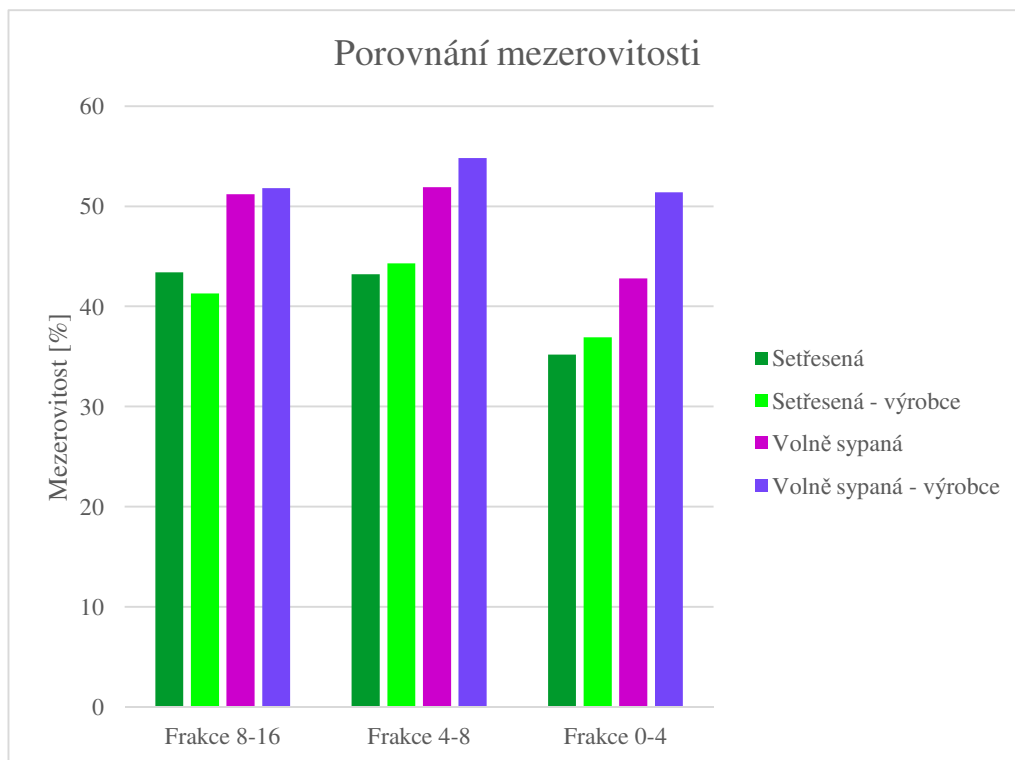
Sypná hmotnost volně sypaná i setřesená je přibližně stejná jako hodnoty stanovené výrobcem, s výjimkou sypné hmotnosti volně sypané pro frakci 0 - 4 mm. Při měření byly dosaženy hodnoty 1430 kg.m⁻³, což je o 240 kg.m⁻³ více, než uvádí výrobce. Výrobce udávané mezerovitosti se shodují s naměřenými hodnotami, opět s výjimkou frakce 0 - 4 mm, kde navíc byla použita hodnota objemové hmotnosti měřená pomocí objemového válce. Podrobný přehled porovnání všech hodnot z této kapitoly s údaji výrobce se nachází v tabulce č. 17 a v grafech (obr. č 15 a 16).

Tabulka 17 - Porovnání sypné hmotnosti a mezerovitost s údaji výrobce

Frakce kameniva [mm]	Porovnávaná vlastnost struskového kameniva	Hodnoty výrobce	Hodnoty získané měřením
8 - 16	Sypná hmotnost - volně syp. [Mg.m ⁻³]	1,11	1,18
	Sypná hmotnost - setřesená [Mg.m ⁻³]	1,33	1,37
	Mezerovitost - volně sypaná [%]	53,7	51,2
	Mezerovitost - setřesená [%]	44,6	43,4
4 - 8	Sypná hmotnost - volně syp. [Mg.m ⁻³]	1,10	1,17
	Sypná hmotnost - setřesená [Mg.m ⁻³]	1,36	1,38
	Mezerovitost - volně sypaná [%]	54,8	51,9
	Mezerovitost - setřesená [%]	44,3	43,2
0 - 4	Sypná hmotnost - volně syp. [Mg.m ⁻³]	1,19	1,43
	Sypná hmotnost - setřesená [Mg.m ⁻³]	1,54	1,62
	Mezerovitost - volně sypaná [%]	51,4	42,8
	Mezerovitost - setřesená [%]	36,9	35,2



Obrázek 15 - Graf porovnání sypné hmotnosti s hodnotami udávanými výrobcem



Obrázek 16 - Graf porovnání mezerovitosti

6.7 Odolnost proti drcení

Odolnost proti drcení lze stanovit dvěma způsoby. První z nich je metoda Los Angeles a druhá je metoda drtitelností v rázu. Pro struskové kamenivo použijeme metodu Los Angeles.

6.7.1 Postup zkoušky stanovení otlukovosti pomocí metody LA

Odolnost proti drcení stanovujeme podle normy ČSN EN 1097-2 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení. [28] Podstatou zkoušky je, že se vzorek kameniva umístí do ocelového bubnu spolu s příslušným počtem ocelových koulí, a otáčením bubnu ocelové koule drtí kamenivo. Samotný buben je z oceli S275 s tloušťkou stěny 12 mm. Vnitřní délka bubnu je 508 ± 5 mm a vnitřní průměr je 711 ± 5 mm. Uvnitř válce se nachází zarážka široká 90 ± 2 mm a tlustá 25 ± 1 mm, která zaručuje pohyb koulí i kameniva. Buben je opatřen motorem umožňujícím otáčení v rychlosti 31 – 33 otáček za minutu. Počet ocelových koulí volíme v případě jiné frakce než (10 - 14) mm dle přílohy B pro alternativní úzký rozsah třídění pro zkoušku Los Angeles. Ocelové koule mají průměr 45 - 49 mm a hmotnost 400 - 445 g. [28]

Zkouška byla provedena dvakrát, jednou pro frakci 8-16 mm a jednou pro frakci 4 - 8 mm, pro frakci 0 - 4 mm se zkouška neprovádí. Vstupní množství kameniva pro zkoušku je 15 kg. Kamenivo se proseje přes rozšířenou sadu sít, promyje se a vysuší se v sušárně na ustálenou hmotnost (při teplotě 110 ± 5 °C po dobu 24 hodin) a pomocí kvartace se odebere množství 5 kg. Před začátkem zkoušky je nutné nejprve vyčistit buben a až poté do něj umístit kamenivo a příslušný počet ocelových koulí. Ten je dle přílohy B stanoven na 8 koulí pro frakci 4 - 8 mm a 10 koulí pro frakci 8 - 11,2 mm. Zde je nutné se z důvodu požadavku posouzení celé frakce odklonit od normového postupu a na frakci 8 - 16 mm použít počet koulí jako na frakci 8 - 11,2 mm. Po uzavření ocelového bubnu můžeme začít s otáčením. Buben se otočí celkem 500 krát při rychlosti 31 – 33 otáček za minutu. Po ukončení otáčení se kamenivo i koule vyjmou z bubnu a buben je pečlivě vyčištěn tak, aby se zamezilo ztrátě vzorku. Na podrceném kamenivu se opět stanoví zrnitost a zaznamenává se zůstatek na síti 1,6 mm. Z důvodu absence síta 1,6 mm byla hodnota odečtena z křivky zrnitosti. Jakmile známe hodnotu zůstatku na síti 1,6 mm, můžeme dopočíst součinitel Los Angeles. [28]

Výpočet součinitele Los Angeles (8) [28]:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} [-] \quad (8)$$

Kde:

m – hmotnost zůstatku na síti 1,6 [g].



Obrázek 17 - Otlukový buben Los Angeles

6.7.2 Odolnost proti drcení struskového kameniva

Výsledný součinitel Los Angeles je v tabulce č. 18, kde se nachází i podrobné údaje o hmotnosti navážky před a po zkoušce a hmotnosti ocelových koulí. V tabulkách č. 19 a 20 jsou uvedeny křivky zrnitosti obou frakcí kameniva po zkoušce, a to včetně grafu (obr. č. 18), ze kterého byla odečtena hodnota zůstatku na síti 1,6 mm.

Tabulka 18 - Stanovení součinitele Los Angeles

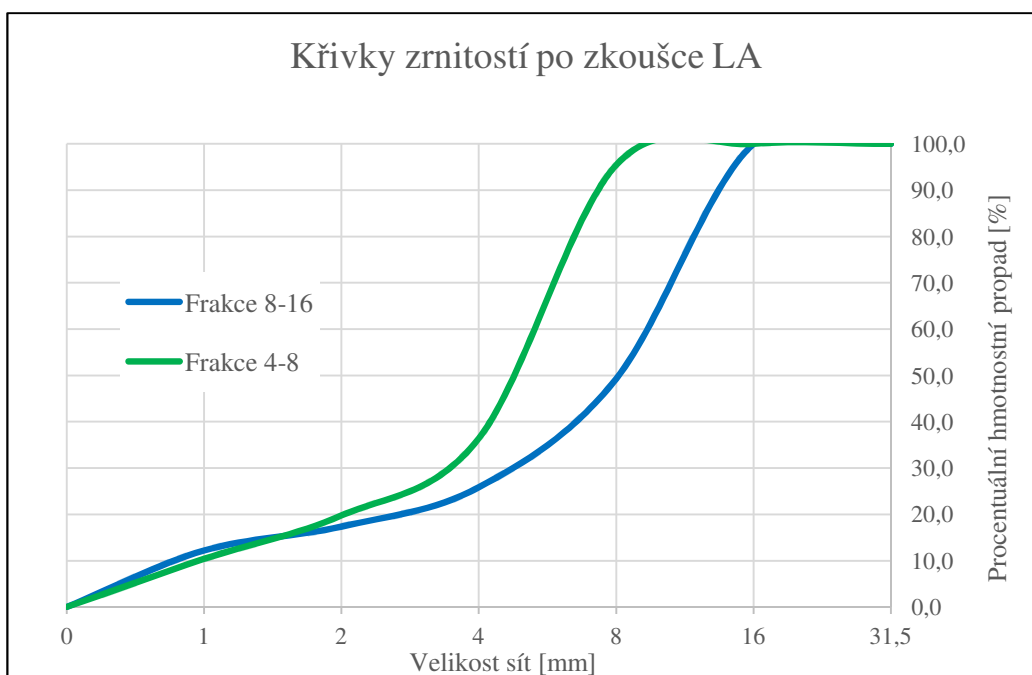
Frakce kameniva [mm]	Vstupní navážka [g]	Stav navážky po zkoušce LA [g]	Zůstatek na síti 1,6mm m [g]	Počet ocelových koulí	Hmotnost ocelových koulí [g]	Součinitel LA
8 - 16	5002,6	4928,4	4139,9	10	4311,6	17,2
4 - 8	5001,3	4936,7	4048,1	8	3527,4	19,0

Tabulka 19 - Výpočet zrnitosti pro frakci 8 - 16 mm po zkoušce otlukovosti LA

Frakce 8 - 16 mm			
Síto [mm]	Hmotnostní zůstatek [g]	Procentuální zůstatek [%]	Procentuální propad [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	2500,4	50,7	49,3
4	1154,6	23,4	25,8
2	418,0	8,5	17,4
1	254,6	5,2	12,2
0	600,8	12,2	0,0
Součet	4928,4		

Tabulka 20 - Výpočet zrnitosti pro frakci 4 - 8 mm po zkoušce otlukovosti LA

Frakce 4 - 8 mm			
Síto [mm]	Hmotnostní zůstatek [g]	Procentuální zůstatek [%]	Procentuální propad [%]
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	226,2	4,6	95,4
4	2913,4	59,0	36,4
2	822,0	16,7	19,8
1	463,1	9,4	10,4
0	512,0	10,4	0,0
Součet	4936,7		



Obrázek 18 - Graf čáry zrnitosti po zkoušce LA

Výrobce stanovil odolnost proti drcení metodou LA pouze na frakci 10 - 14 mm a používá ji v technických listech pro všechny ostatní frakce. Součinitel LA pro frakci 10 - 14 mm 21,9, tj. je vyšší než součinitele zjištěné v experimentu pro frakce 4 - 8 mm a 8 - 16 mm.

6.8 Nasákavost

Nasákavost je schopnost materiálu pojmout kapalinu do své pórové struktury, závisí na množství pórů, ale i na jejich tvaru a velikosti.

6.8.1 Postup stanovení nasákavosti kameniva

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. [31] Nasákavost struskového kameniva se stanovuje podle přílohy B – Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti hrubého kameniva nasáklého do ustálené hmotnosti. Vzorek kameniva musí být odebrán z většího množství kvartací, drobné částice a úlomky se odstraní promýváním přes síto a vzorek se vysuší do ustálené hmotnosti (při teplotě 110 ± 5 °C po dobu 24 h). Pro stanovení nasákavosti musí mít vzorek hmotnost mezi 150 - 350 g. Následně se vzorek vloží do nádoby tak, aby byl zcela ponořen, a po určitých intervalech se provádí kontrolní měření hmotnosti. Při měření se vzorek vyjme, povrch se povrchově osuší a zvaží

se hmotnost kameniva. Tento postup opakujeme až do ustálené hmotnosti, kdy zvážení získáme hmotnost nasáklého kameniva (m_a). Kamenivo poté umístíme k vysušení do ustálené hmotnosti do sušárny (při teplotě 110 ± 5 °C po dobu 24 h) a zvážení dostaneme hmotnost vysušeného kameniva (m_b). Z těchto hodnot můžeme vypočítat nasákavost. [31]

Výpočet nasákavosti kameniva (9) [31]:

$$WA = \frac{m_a - m_b}{m_b} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$

Kde:

m_a – hmotnost nasáklého kameniva [g],

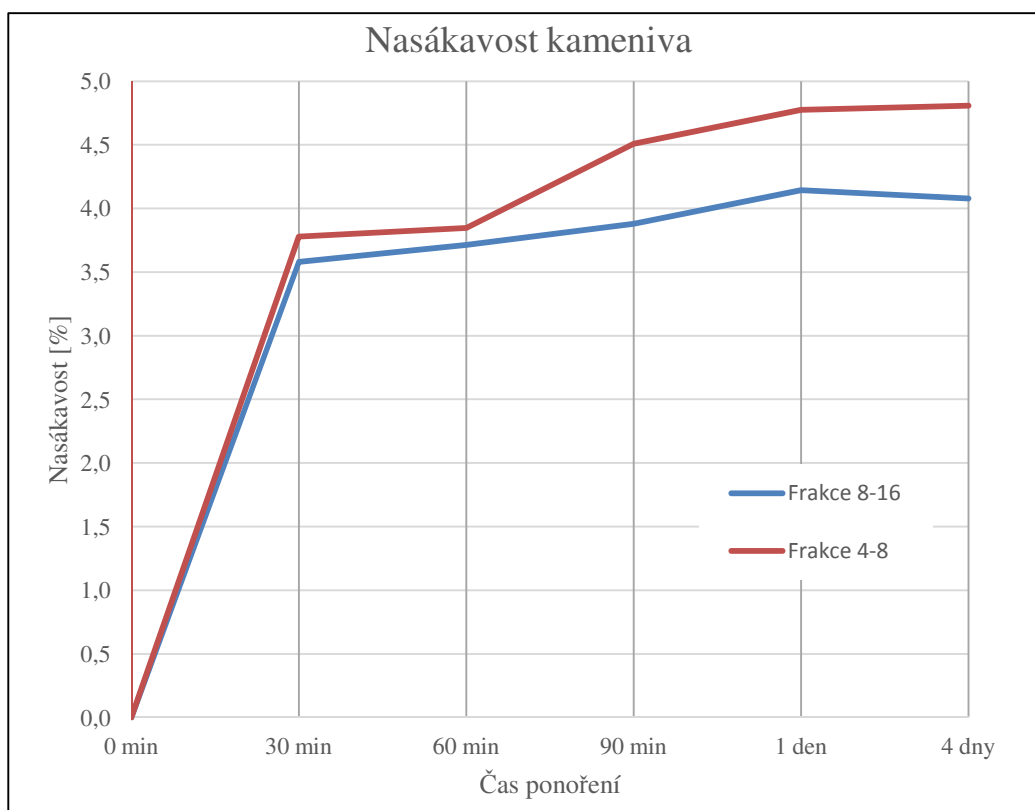
m_b – hmotnost vysušeného kameniva [g].

6.8.2 Nasákavost struskového kameniva

Zkouška nasákavosti byla provedena pro frakci 8 - 16 mm a 4 - 8 mm, pro frakci 0 - 4 mm se neprováděla z důvodu nemožnosti účinného povrchového osušení takto jemného kameniva. Výsledná nasákavost je v tabulce č. 21. Dále zde je umístěn graf (obr. č. 19) s průběhem nasákavosti v čase.

Tabulka 21 - Výsledná nasákavost struskového kameniva v čase

Frakce kameniva [mm]	Hmotnost vysušené navážky [g]	Hmotnost nasáklého kameniva [g]					Výsledná nasákavost WA [%]				
		30 min	60 min	90 min	1 den	4 dny	30 min	60 min	90 min	1 den	4 dny
8 - 16	301,6	312,4	312,8	313,3	314,1	313,9	3,6	3,7	3,9	4,1	4,1
4 - 8	300,1	313,0	313,2	315,2	316,0	316,1	3,8	3,8	4,5	4,8	4,8



Obrázek 19 - Graf vývinu nasákavosti v čase

Ustálená hmotnost nasáknutí byla stanovena na 24 h, nicméně největší nárůst hmotnosti se uskutečnil během prvních 30 minut po ponoření. Nasákavost pro frakci 8 - 16 mm činí 4,1 %, přičemž dle výrobce má dosahovat hodnoty 3,6 %. Nasákavost frakce 4 - 8 mm činí 4,8 %, stejnou hodnotu udává i výrobce. Takto nízké hodnoty odpovídají krystalické strusce s uzavřenou pórovou strukturou. Výsledná nasákavost je v porovnání s přírodním kamenivem srovnatelná s nasákavostí povrchových výlevných vyvřelin nebo hutných sedimentačních hornin.

6.9 Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování neboli mrazuvzdornost, udává schopnost materiálu odolat působení mrazu. Během přeměny vody obsažené v pórové struktuře kameniva z kapalně fáze do fáze pevné dojde k nárůstu objemu o přibližně 9 %, což má za následek vznik pórových tlaků, které mohou dosahovat velmi vysokých hodnot. Mrazuvzdornost je dána pevností materiálu, jeho pórovitostí a druhem pórů.

6.9.1 Postup stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování

Mrazuvzdornost se stanovuje podle normy ČSN EN 1367-1 Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování. [32] Při zkoušce se použijí tři navážky kameniva pro každou frakci. Kamenivo je odebráno z většího vzorku kvartací a promyje se. Velikost navážky dle normy je 2000 g pro frakci 8 - 16 mm a 1000 g pro frakci 4 - 8 mm. Jednotlivé navážky se vysuší do ustálené hmotnosti a získá se vstupní hmotnost kameniva m_a . Kamenivo musí být nasáklé vodou do ustálené hmotnosti, pro zkoušku byla použita demineralizovaná voda. Nasáklé vzorky kameniva se umístí v nerezových nádobách do mrazicího boxu. Hladina vody v nádobě musí být minimálně 10 mm nad úrovní kameniva. V mrazicím boxu je kamenivo vystaveno celkem 10 zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům. Cyklus se skládá ze tří fází. Nejprve je kamenivo z teploty 20 °C ochlazeno na teplotu 0 až -1 °C během 150 ± 60 minut a udržuje se při této teplotě po dobu 210 ± 90 minut. Ve druhé části se teplota sníží na $-17,5 \pm 2,5$ °C během 180 ± 60 minut a udržuje se při této teplotě po dobu nejméně 240 minut. V poslední části cyklu se kamenivo ohřeje pomocí vody na teplotu 20 ± 3 °C a udržuje se při této teplotě maximálně 10 hodin. Celková délka cyklu musí být kratší než 24 hodin a teplota zmrazování nesmí překročit hodnotu -22 °C. Pro přesné nastavení výkonu mrazicího boxu se do jedné nádoby umístí ke kamenivu tepelná sonda, kdy se podle výsledků z prvního cyklu upraví nastavení pro zbývajících 9 cyklů. Po ukončení zmrazování a rozmrazování se kamenivo promyje přes síto, které má velikost otvorů poloviční, než je spodní hranice frakce před zmrazováním, a následně se kamenivo vysuší. Na vysušeném kamenivu se vizuálně stanoví změna povrchu, vznik trhlin a vážením se zjistí hmotnost po zkoušce mrazuvzdornosti m_b . [32]

Výpočet úbytku hmotnost kameniva po zkoušce mrazuvzdornosti (10) [32]:

$$FR = \frac{m_a - m_b}{m_a} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

Kde:

m_a – počáteční hmotnost vysušeného kameniva všech tří navážek[g],

m_b – konečná hmotnost vysušeného kameniva všech tří navážek [g].



Obrázek 20 - Nádoba určená pro zkoušku zmrazování a rozmrazování kameniva

6.9.2 Odolnost struskového kameniva proti zmrazování a rozmrazování

Zkouška byla provedena na frakcích 8 - 16 mm a 4 - 8 mm, pro frakci 0 - 4 mm se zkouška neprovádí. Pro každou frakci byly použity tři nádoby. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 22.

Tabulka 22 - Úbytek hmotnosti střídavým zmrazováním a rozmrazováním

Frakce kameniva [mm]	Celková hmotnost vysušených navážek před zkouškou m_a [g]	Celková hmotnost vysušených navážek po zkoušce m_b [g]	Úbytek hmotnosti po střídavém zmrazování a rozmrazování FR [%]
8 - 16	6000,1	5908,2	1,5
4 - 8	3000,5	2914,4	2,9

Monitor KD20
Funkce Zkouška

Řídicí jednotka KD20

Typ zkoušky **AUTO 7**

Fáze/odp. času **STOP** **0:00:00**

Teplota prostoru **Skutečná 18,7** **Cílová**

Hladina prostoru **2**

Cyklus/čas cyklu **9** **0:00:00**

Obsazení grafické paměti **3870 / 385**

GrafMonitor **Záznam**

Parametry zkoušky

Číslo měření	1	Čas přechodu T1/-T [min]	80
Počet cyklů	10	Teplota -T [°C]	-18
Start od cyklu	9	Doba -T [min]	400
Čas ochlazování [min]		Teplota Tvzdmín [°C]	-22
Čas přechodu +T/T0 [min]	90	Teplota T2 [°C]	
Teplota T0 [°C]		Čas přechodu -T/T2 [min]	
Teplota T0a [°C]	-7	Čas oteplování [min]	
Teplota T0b [°C]	-15	Teplota +T [°C]	19
Doba T0 [min]	60	Doba +T [min]	200
Čas přechodu T0/-T [min]		Hladina [cm]	20
Čas přechodu T0/T1 [min]	60	Teplota zás.vody [°C]	21
Teplota T1 [°C]	-17		

KD20

Kompresor ☐

Ohřev / chlazení ☐

Chlazení vika ☐

Ventilátor ☐

Nepouštění ☐

Vypouštění ☐

Cirkulace ☐

Ohřev zás.vody ☐

Ohřev rámu ☐

Číslo zapnuto

Teplota T1 [°C] ☒ **18,7**

Teplota T2 [°C] ☒ **19,1**

Teplota T3 [°C] ☒ **18,3**

Teplota T4 [°C] ☒ **18,8**

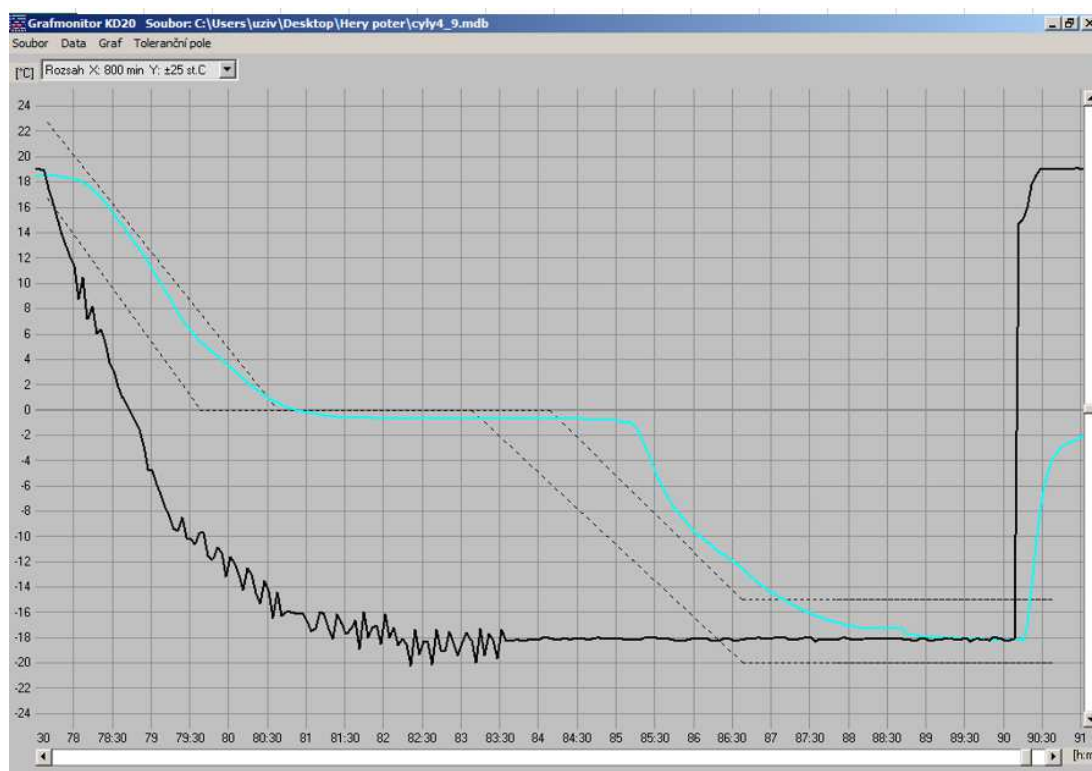
Teplota T5 [°C] ☒ **18,8**

Průměrná Tp [°C] **18,7**

Teplota Tzás [°C] **21,4**

Hladina [cm] **2**

Obrázek 21 - Zadání údajů před začátkem zmrazování



Obrázek 22 - Průběh jednoho ze zmrazovacích cyklů

Výsledný úbytek hmotnosti činí 1,5 % pro frakci 8 - 16 mm a 2,9 % pro frakci 4 - 8 mm. Výrobce stanovoval úbytek pouze na frakci 10 - 14 mm s výsledkem 0,6 %. Na kamenivu po zkoušce nebyly zpozorovány žádné viditelné změny.

6.10 Pevnost v tlaku

6.10.1 Postup stanovení pevnosti kameniva v tlaku

Pro stanovení pevnosti kameniva existuje norma ČSN EN 191-11 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 11: Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórovitého kameniva. [33] Navzdory tomu, že zohledňuje pouze pórovité kamenivo, se přesto provedení zkoušky snažilo přiblížit normě. Z důvodu absence formy, ve které má probíhat zatěžování, bylo měření provedeno na ocelové formě pro betonové krychle (150 x 150 x 150 mm), a na další zkoušení byla použita masivní forma na zámkovou dlažbu.

Výpočet pevnosti v tlaku (11):

$$\sigma = \frac{F}{A} [MPa] \quad (11)$$

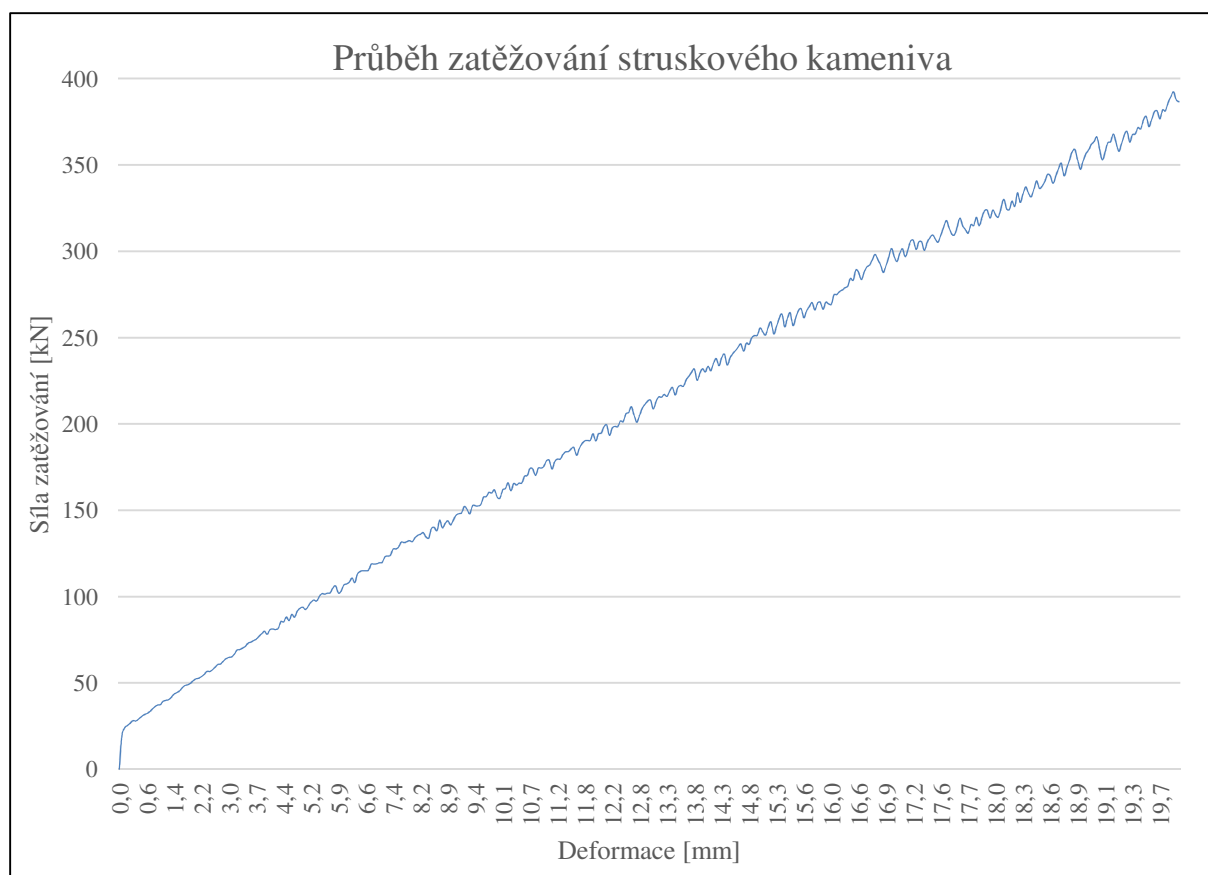
Kde:

A je plocha formy [mm²],

F síla zatežování [N].

6.10.2 Pevnost struskového kameniva v tlaku

Při zatížení struskového kameniva v krychlové formě při hodnotě 90 kN docházelo k pootevření bočních stěn formy a postupného drcení a vypadání jednotlivých zrn. Z tohoto důvodu bylo další měření provedeno ve formě na zámkovou dlažbu. Před samotnou zkouškou bylo kamenivo zhutněno na vibračním stolci. Forma byla umístěna do lisu a zatěžována rychlostí 2 mm za sekundu do deformace 20 mm. I předem hutněné kamenivo se postupně hutnilo a následně deformovalo plynule. Po hranici poklesu o 20mm byla forma vyjmuta, jednotlivá zrna byla značně zdeformovaná a z důvodu poškození povrchu formy od podrcených zrn se od opakování zkoušky upustilo. Pro přesnější výsledek pevnosti by u takto pevného kameniva bylo pravděpodobně nutné použít větší formu a větší vrstvu kameniva. Výsledný průběh zatěžování se nachází v obrázku č. 23. Výpočet nebyl proveden, během zatěžování nebylo dosaženo zřetelné hranice deformace.



Obrázek 23 - Graf průběhu zatežování kameniva ve formě zámkové dlaždice



Obrázek 24 - Forma na betonovou krychli po zkoušce pevnosti strusky v tlaku.



Obrázek 25 - Forma na zámkovou dlažbu naplněná struskovým kamenivem.



Obrázek 26 - Zdeformovaná strusková zrna po zkoušce pevnosti kameniva v tlaku.

6.11 Chemické složení – spektrometrie a termální analýza

Chemické složení bylo stanoveno pomocí spektrometrie a termální analýzy.

6.11.1 Princip spektrometrie

Chemické složení se stanovuje pomocí spektrometru. Jedná se o přístroj, který vyzařuje na vzorek určité záření (rentgenové) a dochází k excitaci jednotlivých elektronů. Rentgenová spektrometrie řeší ty elektrony, které se po excitaci do virtuálního stavu navrátí do nižší vrstvy, než v které se nacházely před ozáření. Při přechodu mezi vrstvami dojde k vyzáření rozdílu energie v podobě toku fotonů, kde ze spektrální čáry přístroj analyzuje chemické složení. [36]

6.11.2 Chemické složení stanovené spektrometrem

Spektrometr zvlášť stanovuje procentuální podíl prvků a zvlášť podíl sloučenin, přičemž v sloučenině jsou obsaženy i všechny nižší sloučeniny. Přehled chemického složení je v tabulce č. 23 a 24. Množství síry (2,3 %) a železa (1,3 %) je velmi vysoké a hrozí problémy s rozpadem. Obsah CaO (43,5 %) je také relativně vysoký při porovnání se struskou z ostatních železáren. Naopak SiO₂ (30,9 %) a MgO (1,7 %) mají hodnoty nižší, než je u vysokopecní strusky běžné.

Tabulka 23; 24 - Chemické složení strusky stanovené spektrometrem

Prvek	Procentuální podíl [%]
Bal	39,246
Ca	31,044
Si	14,427
Al	8,615
S	2,250
Fe	1,250
Mn	0,985
K	0,640
Ti	0,300
Ba	0,100
Zr	0,022
Cr	0,022
V	0,020
Cl	0,018
Zn	0,011
Cu	0,003

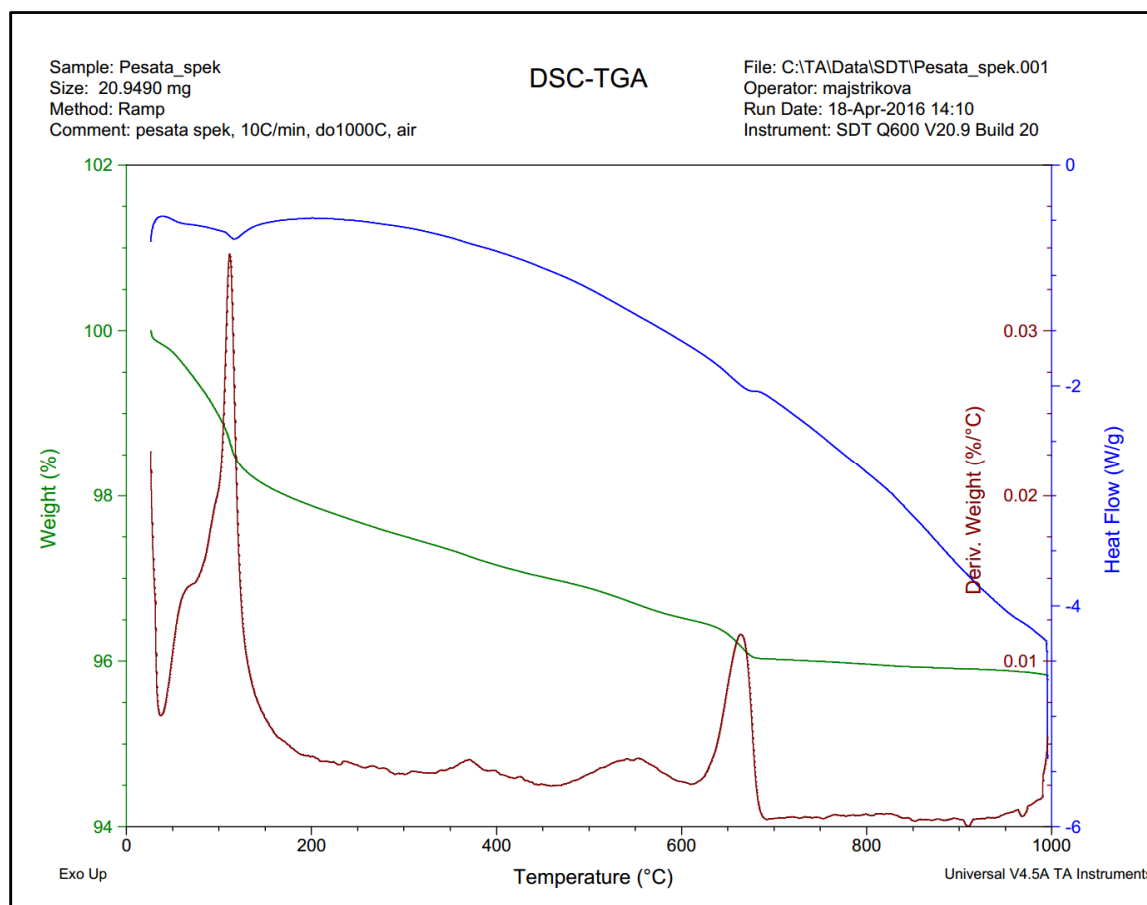
Sloučenina	Procentuální podíl [%]
CaO	43,462
SiO ₂	30,875
Al ₂ O ₃	16,282
SO ₃	5,625
Fe ₂ O ₃	1,787
MgO	1,702
K ₂ O	0,775

6.11.3 Princip termální analýzy

Vzorek byl analyzován pomocí kombinace metod termální gravimetrie (TG) a difrakční skenovací kalorimetrie (DSC). Při termální gravimetrii je vzorek postupně ohříván a sledují se změny jeho hmotnosti. Pro snadnější identifikaci se také derivuje změna hmotnosti podle teploty. Metoda DSC spočívá v současném zahřívání zkoušeného vzorku a referenčního tělesa, přičemž přístroj měří rozdíl mezi tepelným tokem vzorku a reference tak, aby oba měly stejnou teplotu. [34]

6.11.4 Obsah částic stanovených termální analýzou

Výsledky termální analýzy se nachází v grafu (obr. č. 27). Při hodnocení podle derivace hmotnosti (červená křivka) se u vzorku se nachází první peak při 120 °C kdy se jedná o sírany. Druhý výrazný peak se nachází v 650 °C a jedná se o reakci vápence. [34]



Obrázek 27 - Graf výsledných křivek jednotlivých metod termální analýzy

7 Zhodnocení použitelnosti kameniva v hydraulicky stmelených směsích

7.1 Granulometrické vlastnosti

Kamenivo je dodáváno ve frakcích 8 - 16 mm, 4 - 8 mm a 0 - 4 mm, tedy frakcích běžně používaných v betonářském průmyslu. Kamenivo je členěno do frakcí pomocí třídících linek, a tak nadsítná a podsítná zrna tvoří zanedbatelné minimum. Z hlediska tvaru zrna prochází přes dva druhy drcení a v případě frakcí 8 - 16 mm a 4 - 8 mm je tvarový index velmi příznivý pro použití v betonových nebo jiných stmelených směsích. Celkově je z granulometrického složení kamenivo vhodné pro použití v betonech.

7.2 Mechanické vlastnosti

Objemová hmotnost kameniva se nachází mezi 2400-2500 kg.m⁻³, tudíž kamenivo můžeme klasifikovat jako hutné, a je tedy vhodné pro použití v běžných betonech či jiných hydraulických směsích. Pórovitost kameniva je přibližně 19 %, nasákavost se pohybuje okolo 4 %, tudíž se přibližně rovná některým přírodním horninám vulkanického výlevného původu a je potřeba nasákavost zohlednit při návrhu receptury betonu.

7.3 Chemické vlastnosti

Při stanovení chemického složení pomocí spektrometru i pomocí termické analýzy bylo zjištěno, že složení strusky je odlišné od běžného standartu. Struska má vysoký obsah síry a železa a nadprůměrný obsah CaO na hranici vzniku silikátového rozpadu. Naopak obsah SiO₂ je nižší, než je u vysokopecní strusky běžné. Bylo by vhodné provést zkoušku rozpadavosti v autoklávu pro upřesnění vlivu tohoto konkrétního složení, protože se jedná o velmi důležitou vlastnost především u struskového kameniva a chemické složení naznačuje pravděpodobný vznik objemových anomálií.

Na kamenivu byla ve Státní ústavu radiační ochrany provedena zkouška na obsah radionuklidů. Výsledky zkoušky jsou zobrazeny v tabulce č. 25. [35]

Tabulka 245 - Výsledné hodnoty radionuklidů ve struskovém kamenivu[35]

Radionuklid	Naměřená aktivita [Bq.kg ⁻¹]
²²⁶ Ba	85±9
²²⁸ Th	73±7
⁴⁰ K	300±20
Index	0,75±0,05

Index hmotnostní aktivity převyšuje hodnotu $I = 0,5$, a proto se materiál nesmí používat jako stavební materiál v obytných stavbách v místnostech s častou přítomností osob. Index je menší než $I = 1,0$ a $I = 2,0$, tudíž se materiál může využívat v obytných stavbách mimo prostory s častým pobytem osob. [35]

Tedy vhodným využitím (při ověření objemové stálosti) jsou v obytných stavbách konstrukce základové, konstrukce suterénních prostor, technických místností a garáží. Mimo obytné stavby je možné materiál využít na skladovací objekty (mimo skladování potravin). Vysoká míra uplatnění je v dopravním stavitelství. Struskové kamenivo je vhodné svými vlastnostmi na použití do obrusných vrstev vozovek. Dále na konstrukce mostů, opěrných a zárubních stěn a ostatních dopravních staveb.

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ověření základních mechanických a fyzikálních vlastností struskového kameniva produkovaného firmou Destro s.r.o. Během posledních let bylo v naší zemi, především v Moravskoslezském kraji, zaznamenáno několik případů, kdy došlo k deformaci konstrukce a vzniku trhlin (dálnice D47, prodejna Mountfield Ostrava-Svinov, část obchodního centra Avion Shopping Park v Ostrava-Zábřeh). Tyto problémy jsou často spojovány právě se struskovým kamenivem. Přitom existuje celá řada druhů struskových kameniv, která se od sebe podstatně liší procesem vzniku, chemickým složením, druhem úpravy a samozřejmě konečnými vlastnostmi. Teoretická část práce se zabývá základním dělením struskových materiálů včetně procesu úpravy a možností využití ve stavebnictví. Strusky, jež jsou v dnešní době produkovány hutnickým průmyslem, jsou obecně považovány za velmi kvalitní a bezproblémový materiál. Problémové jsou především strusky historické, které se v současnosti odtěžují z odvalů (hutních skládek). Je také potřeba rozlišovat mezi struskami z výroby železa, oceli a dalších neželezných kovů. Strusky z výroby železa se v minulosti pozvolna ochlazovaly a vzniklé strusky se používaly jako kamenivo (to je i případ strusky od firmy Destro s.r.o.). V dnešní době je většina produkce vysokopecní strusky upravována granulací s následným mletím a využitím při výrobě cementu, především z ekonomických důvodů. Ocelářské strusky se naproti tomu využívají v drtivé většině jako kamenivo. Strusky z neželezných kovů nejsou v Evropě využívány ve stavebnictví, nicméně v USA a Kanadě se především strusky z výroby niklu považují za kvalitní a bezproblémový stavební materiál.

V praktické části byly postupně stanovovány základní granulometrické, mechanické a fyzikální vlastnosti se zohledněním možnosti laboratoře stavebních hmot FAST. Výsledné hodnoty zkoušek byly porovnány s výsledky stanovenými ve Zkušebně kamene a kameniva Hořice s.r.o., které uvádí výrobce na svých stránkách. Granulometrické vlastnosti (zrnitost a tvarový index) souhlasí s údaji výrobce. Taktéž měrná, objemová a sypná hmotnost je srovnatelná. Při zkoušení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles byly použity postupy z přílohy normy pro úzké frakce kameniva, naproti tomu ZKK Hořice s.r.o. zkoušku provedl na frakci 10 - 14 mm, přesto jsou výsledné hodnoty porovnatelné. Shodují se i hodnoty nasákavosti a odolnosti proti opakovanému zmrazování a rozmrazování.

Nad rámec ověření zkušebního listu bylo provedeno několik pokusů o stanovení pevnosti kameniva v tlaku, na jejichž základě bylo potvrzeno, že způsob dle normy ČSN EN 1097-11 není vhodný pro struskové kamenivo. Dále bylo stanoveno chemické složení, kde byly zjištěny vysoké hodnoty obsahu železa, síry a oxidu vápenného, tedy prvky a sloučeniny, které se mohou podílet na silikátovém a železnatém rozpadu. Proto by bylo vhodné provést zkoušku rozpadavosti v autoklávu, kterou výrobce v technické dokumentaci kameniva neuvádí.

V poslední části bylo provedeno hodnocení kameniva pro použití v hydraulicky stmelené směsi. Dle granulometrických a mechanických vlastností je kamenivo vhodné pro použití v betonech, avšak je při návrhu nutno zohlednit jeho nasákavost. Z chemického hlediska může zvýšená koncentrace síry a CaO způsobovat problémy a bylo by vhodné, aby výrobce doplnil informace o kamenivu výsledkem zkoušky rozpadavosti v autoklávu. Dále byla hodnocena použitelnost na základě zkoušky přítomnosti přírodních radionuklidů provedené ve Státním ústavu radiační ochrany. Podle hodnoty indexu hmotnostní aktivity není doporučeno použít kamenivo na konstrukce v obytných místnostech a místnostech, kde se předpokládá přítomnost osob. Kamenivo je vhodné pro ostatní místnosti (suterén, technické zázemí) a pro dopravní stavby.

Struskové kamenivo dnes už není řazeno mezi odpad, ale je s ním počítáno jako s druhotnou surovinou. Je-li ověřena rozpadavost a další zmíněná rizika, pak se jedná o kvalitní a hodnotnou stavební surovinu s velkým potenciálem využití ve výstavbě. Je potřeba dbát na ověření objemových změn, jelikož v důsledku jednoho špatného zdroje kameniva poté dochází ke zkreslenému pohledu veřejnosti na všechny strusky jako celek a bylo by neracionální nevyužívat kvůli tomu i kvalitní druhy struskového kameniva.

Seznam použité literatury

- [1] MATOUŠEK, Milan. *Lehké stavební hmoty*. Vyd. nezměn. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [2] DROCYHTKA, Jaroslav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2006.
- [3] VIDLÁŘ, Jiří, Zdenka RŮŽIČKOVÁ a Jaroslav SRB. *Úprava druhotných surovin*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1985.
- [4] KALOČ, Miroslav, Ludvík BROŽ a Ján KRET. *Hutnictví železa I: (koksárenství a železářství) [záznam a]*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1986.
- [5] BROŽ, Ludvík. *Výroba surového železa*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1964.
- [6] VOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [7] MYSLIVEC, Theodor. *Fyzikálně chemické základy ocelářství*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971.
- [8] KRESTA, František. *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství*. 1. vyd. Přeložil Rudolf ŠTEFEC. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2890-9.
- [9] RŮŽIČKOVÁ, Zdenka, Jaroslav SRB a Jiří VIDLÁŘ. *Druhotné suroviny - nové zdroje průmyslu*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [10] IREM, Zeynep, Yildirim a Monica, PREZZI. *Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag*. Advances in Civil Engineering, vol. 2011, Article ID 463638, 13 stran, 2011.
- [11] *Hornická skripta: Vysoké pece a výroba oceli* [online]. [cit. 15.4.2016]. Dostupné online z <http://www.hornictvi.info/prirucka/>
- [12] KONEČNÁ, Lucie, 2011. *Možnosti získávání mědi ze strusek*. Ostrava. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta.
- [13] ČÍŽEK, Zdeněk, 2008. *Metalurgické strusky – specifický druh odpadu* [online]. Plzeň: Analytická laboratoř Plzeň s.r.o., Poslední změna 16. 7. 2009 [cit. 15. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/metalurgicke-strusky-specificky-druh-odpadu/>
- [14] *Nonferrous slags, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* [online]. Office of Research, Development, and Technology, Office of Safety, RDT, 8. 3. 2016. [cit. 15.4.2016], dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/nfs1.cfm>
- [15] *Nonferrous slags – asphalt concrete, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* [online]. Office of Research, Development, and Technology, Office of Safety, RDT, 8. 3. 2016. [cit. 15.4.2016], dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/nfs2.cfm>
- [16] SHERWOOD, P. *Alternative materials in road construction: a guide to the use of recycled and secondary aggregates*. 2nd ed. London: Thomas Telford, 2001. ISBN 0-7277-3031-2.
- [17] KUCHAR, Lumír. *Hutnictví neželezných kovů: obecná část, pyrometalurgie [záznam]*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1987.

- [18] BROŽ, Ludvík. *Hutnictví železa*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [19] VLČEK, Jozef. *Materiálové využití strusek z metalurgie železa a oceli metodou alkalické aktivace*. Habilitační práce Ostrava: MS FMMI VŠB-TUO, 2008.
- [20] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton* [CD-ROM]. 1. vyd. Přeložil Vlastimil BÍLEK, přeložil Halina SZKLORZOVÁ. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [21] *Euroslag, The European association representing metallurgical slag producers and processors* [online]. Duisburg, Germany: EUROSLAG. [cit. 8. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.euroslag.org/>
- [22] TP 138, 2011. *Užití struskového kameniva do pozemních komunikací*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební
- [23] *Stavební materiály a odpady – Destro* [online]. Kladno: 2014 [cit. 9.4.2015]. Dostupné z: <http://www.destro.cz/new/stavebni-material-odpady.html>
- [24] *Powerscreen: Mobile crushing equipment and mobile screening equipment* [online]. Louisville, Kentucky, USA: [cit. 11.4.2015]. Dostupné z: <http://www.powerscreen.com/>
- [25] ČSN EN 933-1, 2012. *Zkoušení granulometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut.
- [26] ČSN EN 933-4, 2008. *Zkoušení granulometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index*. Praha: Český normalizační institut.
- [27] ČSN EN 13242+A1, 2008. *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*. Praha: Český normalizační institut.
- [28] ČSN EN 1097-2, 2010. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení*. Praha: Český normalizační institut.
- [29] ČSN EN 1097-7, 2008. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška*. Praha: Český normalizační institut.
- [30] ČSN EN 1097-3, 1999. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: Český normalizační institut.
- [31] ČSN EN 1097-6, 2014. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Český normalizační institut.
- [32] ČSN EN 1367-1, 2007. *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování*. Praha: Český normalizační institut.
- [33] ČSN EN 1097-11, 2014. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 11: Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórového kameniva*. Praha: Český normalizační institut.
- [34] RAMACHANDRAN, Vilaynaur, Subramanian. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. Norwich: Noyes Publications/William Andrew Publishing, c2003. ISBN 0-8155-1487-5.

[35] Protokol o zkoušce č 380/2015, *Měření obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech*. Státní ústav radiační ochrany, Bartoškova, Praha 4

[36] KOPLÍK, Richard. *Metody atomové spektrometrie* [online]. Ústav analýzy potravin a výživy, Praha. [cit. 21.4.2016]. Dostupné z: <http://www.web.vscht.cz/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma kyslíkového konvektoru (BOF) [10]	13
Obrázek 2 - Schéma elektrické obloukové pece (EAF) a pánvové pece (LD) [10]	14
Obrázek 3 - Celkové schéma výroby železa a oceli [10].....	16
Obrázek 4 - Přehled základních možností úpravy vysokopecní strusky [21].....	24
Obrázek 5 - Struskové kamenivo DESTRO frakce 8 - 16 mm.....	28
Obrázek 6 - Struskové kamenivo DESTRO frakce 4 - 8 mm.....	28
Obrázek 7 - Část sady normových sít	30
Obrázek 8 - Porovnání zrnitostí jednotlivých frakcí.....	33
Obrázek 9 - Dvoučelist'ové měřidlo, určené pro stanovení tvarového indexu	35
Obrázek 10 - Pyknometr uzavřený zbrúšenou zátkou	37
Obrázek 11 - Mlecí nádoba vibračního mlýnu	38
Obrázek 12 - Zkušební nádoba o objemu 5 l.....	44
Obrázek 13 - Zkušební nádoba o objemu 1 l.....	44
Obrázek 14 - Graf porovnání volně sypané a setřesené sypné hmotnosti	46
Obrázek 15 - Otlukový buben Los Angeles	49
Obrázek 16 - Graf čáry zrnitosti po zkoušce LA.....	51
Obrázek 17 - Graf vývinu nasákavosti v čase	53
Obrázek 18 - Nádoba určená pro zkoušku zmrazování a rozmrazování kameniva.....	55
Obrázek 19 - Zadání údajů před začátkem zmrazování.....	56
Obrázek 20 - Průběh jednoho ze zmrazovacích cyklů.....	56
Obrázek 21 - Graf průběhu zatežování kameniva ve formě zámkové dlaždice	58
Obrázek 22 - Forma na betonovou krychli po zkoušce pevnosti strusky v tlaku.	58
Obrázek 23 - Forma na zámkovou dlažbu naplněná struskovým kamenivem.	59
Obrázek 24 - Zdeformovaná strusková zrna po zkoušce pevnosti kameniva v tlaku.....	59
Obrázek 25 - Graf výsledných křivek jednotlivých metod termální analýzy	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 – porovnání chemického složení ocelářských strusek [10]	15
Tabulka 2 Chemické složení vysokopecních strusek z hutí v České republice [19]	20
Tabulka 3 - Vstupní navážky kameniva pro síťový rozbor.....	31
Tabulka 4 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 8 - 16 mm.....	31
Tabulka 5 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 4 - 8 mm.....	32
Tabulka 6 - Výpočet zrnitosti pro kamenivo frakce 0 - 4 mm.....	32
Tabulka 7 - Stanovení obsahu jemných částic.....	33
Tabulka 8 - Stanovení tvarového indexu SI pro jednotlivé frakce kameniva.....	35
Tabulka 9 - Měrná hmotnost strusky stanovena pyknometricky.....	38
Tabulka 10 - Objemová hmotnost kameniva stanovená pomocí odměrného válce	39
Tabulka 11 - Objemová hmotnost kameniva stanovena pyknometricky.....	41
Tabulka 12 - Průměrné hodnoty objemové hmotnosti	42
Tabulka 13 - Stanovená pórovitost struskového kameniva	42
Tabulka 14 - Hodnoty sypné hmotnosti volně sypané i v setřeseném stavu.	45
Tabulka 15 - Průměrné sypné hmotnosti pro jednotlivé frakce.....	45
Tabulka 16 - Mezerovitost struskového kameniva.....	46
Tabulka 17 - Porovnání sypné hmotnosti a mezerovitost s údaji výrobce	47
Tabulka 18 - Stanovení součinitele Los Angeles	50
Tabulka 19 - Výpočet zrnitosti pro frakci 8 - 16 mm po zkoušce otlukovosti LA.....	50
Tabulka 20 - Výpočet zrnitosti pro frakci 4 - 8 mm po zkoušce otlukovosti LA.....	50
Tabulka 21 - Výsledná nasákavost struskového kameniva v čase	52
Tabulka 22 - Úbytek hmotnosti střídavým zmrazováním a rozmrazováním	55
Tabulka 23; 24 - Chemické složení strusky stanovene spektrometrem.....	60
Tabulka 25 - Výsledné hodnoty radionuklidů ve struskovém kamenivu[35].....	63

Seznam příloh

Příloha č. 1 schéma drtící a třídící linky Powerscreen Chieftain 1400

Příloha č. 2 – schéma třídící linky a kamenivo do betonu

Příloha č. 3 – Protokol o zkoušce pro struskové kamenivo frakce 8 – 22 mm

Příloha č. 4 – Protokol o zkoušce pro struskové kamenivo frakce 2 – 8 mm

Příloha č. 5 – Protokol o zkoušce pro struskové kamenivo frakce 0 – 4 mm

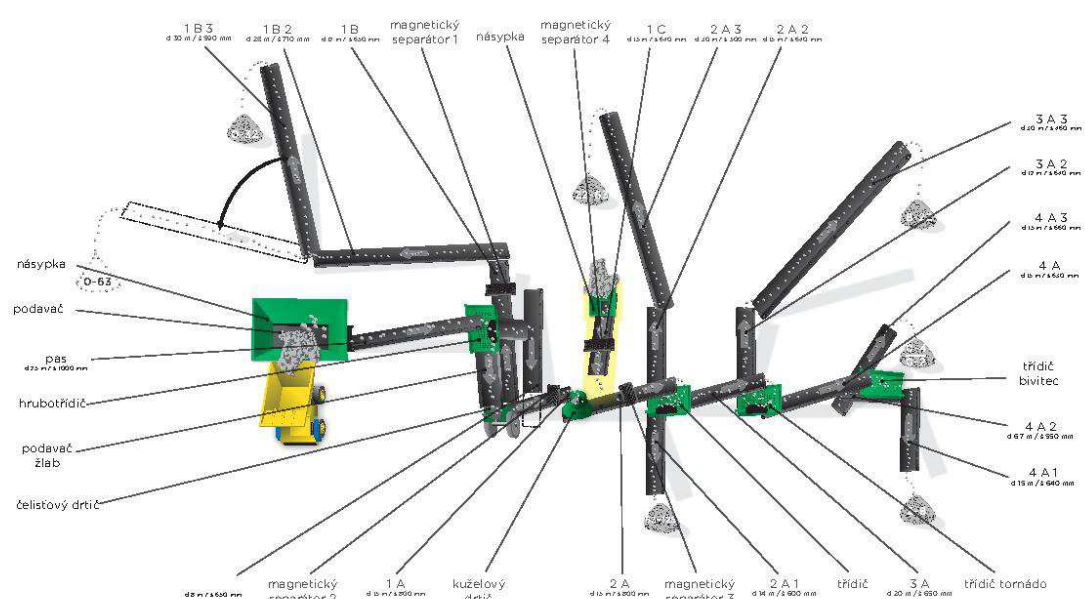


schéma drticí linky na strusku

ODPAD MĚNÍME V MATERIÁL

WWW.DESTRO.CZ

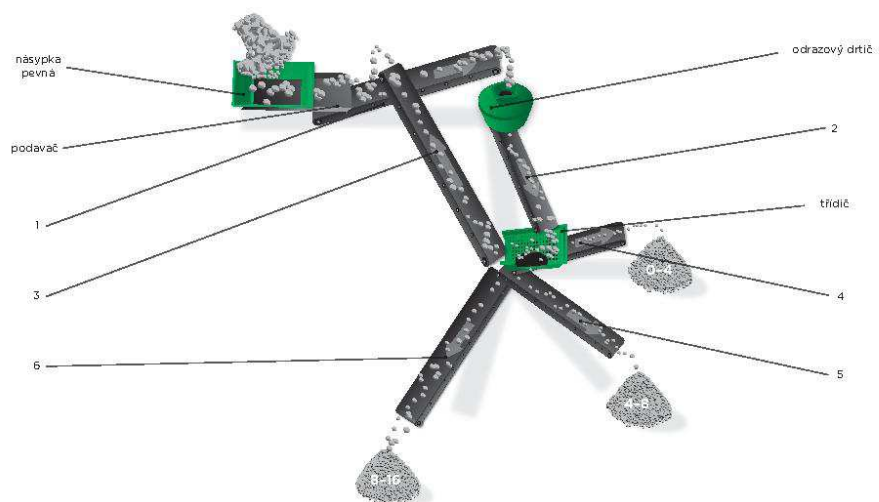


schéma drticí linky kameniva do betonu

**PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA
POČÁTEČNÍ ZKOUŠKY TYPU (ITT)
HRUBÉ DRCENÉ KAMENIVO**

Frakce (d/D) 8 / 22

Zakázka čís. : 1688/11
Provozovna : Kladno - halda Koněv
Hornina : Vzduchem chlazená
vysokopecní struska

Místo odběru : Skládka
Datum odběru : 14.7.2011
Odběr provedl : J. Ptáček, M. Barchánek

Vzorek číslo : 4786/11

Zrnitost kameniva		Identifikace metody	Jednotky	Hodnota propadu	Poznámka
Propad síťovými otvory (mm)					
2D	45	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
1,4D	31,5	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
D	22,4	ČSN EN 933-1	% hm.	98,8	
D/1,4	16	ČSN EN 933-1	% hm.	48,7	
d	8	ČSN EN 933-1	% hm.	2,6	
d/2	4	ČSN EN 933-1	% hm.	1,7	

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	0,5	
Tvar zrn - tvarový index > 3	ČSN EN 933-4	% hm.	3,9	
Podíl zrn ostrohranných	ČSN EN 933-5	% hm.	100	
Odolnost proti drcení - součinitel LA ¹⁾	ČSN EN 1097-2	-	21,9	
Nasákavost	ČSN EN 1097-6	% hm.	3,6	
Trvanlivost zkouškou síranem hořečnatým - úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	-	
Trvanlivost zkouškou síranem sodným - úbytek po 5 cyklech	ČSN 72 1176	% hm.	-	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ¹⁾ - úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,6	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1	% hm.	-	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,967	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,975	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,108	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0	
Rozlišné částice (nečistoty)	ČSN 72 1180	% hm.	-	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,403	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,160	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,411	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	51,8	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	41,3	

¹⁾ Zkouška byla provedena na frakci 10/14.

Za správnost odpovídá

Jaroslava Soukupová
zástupce vedoucího zkušební laboratoře



**PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA
POČÁTEČNÍ ZKOUŠKY TYPU (ITT)
DRCENÉ KAMENIVO**

Frakce (d/D) 2 / 8

Zakázka čís. : 1688/11
Provozovna : Kladno - halda Koněv
Hornina : Vzduchem chlazená
vysokopecní struska

Místo odběru : Skládka
Datum odběru : 14.7.2011
Odběr provedl : J. Ptáček, M. Barchánek

Vzorek číslo : 4785/11

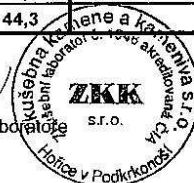
Zrnitost kameniva		Identifikace metody	Jednotky	Hodnota propadu	Poznámka
Propad síťovými otvory (mm)					
2D	16	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
1,4D	11,2	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
D	8	ČSN EN 933-1	% hm.	97,9	
D/2	4	ČSN EN 933-1	% hm.	50,8	
d	2	ČSN EN 933-1	% hm.	9,6	
d/2	1	ČSN EN 933-1	% hm.	2,7	

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	1,3	
Tvar zrn - tvarový index > 3	ČSN EN 933-4	% hm.	8,3	
Podíl zrn ostrohranných	ČSN EN 933-5	% hm.	100	
Odolnost proti drcení - součinitel LA ¹⁾	ČSN EN 1097-2	-	21,9	
Nasákavost	ČSN EN 1097-6	% hm.	4,8	
Trvanlivost zkouškou síranem hořečnatý - úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	-	
Trvanlivost zkouškou síranem sodným - úbytek po 5 cyklech	ČSN 72 1176	% hm.	-	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování ¹⁾ - úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,6	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1	% hm.	-	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,967	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,975	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,108	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	-	
Rozlišné částice (nečistoty)	ČSN 72 1180	% hm.	-	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,437	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,102	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,357	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	54,8	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	44,3	

¹⁾ Zkouška byla provedena na frakci 10/14.

Za správnost odpovídá

Jaroslava Soukupová
zástupce vedoucího zkušební laboratoře



PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA POČÁTEČNÍ ZKOUŠKY TYPU (ITT) DRCENÉ KAMENIVO

Frakce (d/D) 0 / 4

Zakázka čis. : 1688/11
Provozovna : Kladno - halda Koněv
Hornina : Vzduchem chlazená
vysokopecní struska

Místo odběru : Skládky
Datum odběru : 14.7.2011
Odběr provedl : J. Ptáček, M. Barchánek

Vzorek číslo : 4784/11

Zrnitost kameniva		Identifikace metody	Jednotky	Hodnota propadu	Poznámka
Propad síťovými otvory (mm)					
2D	8	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
1,4D	5,6	ČSN EN 933-1	% hm.	100,0	
D	4	ČSN EN 933-1	% hm.	92,6	
D/2	2	ČSN EN 933-1	% hm.	56,1	
D/4	1	ČSN EN 933-1	% hm.	36,7	
0,5	0,5	ČSN EN 933-1	% hm.	23,6	
0,25	0,25	ČSN EN 933-1	% hm.	15,1	
0,125	0,125	ČSN EN 933-1	% hm.	9,9	
0,063	0,063	ČSN EN 933-1	% hm.	6,5	

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic	ČSN EN 933-1	% hm.	6,5	
Jakost jemných částic				
Zkouška methylenovou modří MB _F	ČSN EN 933-9	g/kg	-	
Zkouška ekvivalentu písku	ČSN EN 933-8	-	70	
Mez plasticity W _p	ČSN CEN ISO/TS 17892-12	% hm.	-	
Mez tekutosti W _L		% hm.	-	
Index plasticity I _p		% hm.	-	
Humusovitost	ČSN EN 1744-1, kap. 15.1	-	Negativní zkouška	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1, kap. 8	% hm.	-	
Obsah síranů rozpustných v kyselině	ČSN EN 1744-1, kap. 12	% hm.	0,967	
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1, kap. 11	% hm.	0,975	
Obsah ve vodě rozpustných síranů	ČSN EN 1744-1, kap. 10	% hm.	0,108	
Nasákavost	ČSN EN 1097-6	% hm.	6,9	
Trvanlivost zkouškou síranem hořečnatým - úbytek po 5 cyklech	ČSN EN 1367-2	% hm.	-	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - úbytek po 10 cyklech	ČSN EN 1367-1	% hm.	-	
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1, kap. 14.2	% hm.	0,0	
Rozlišné částice (nečistoty)	ČSN 72 1180	% hm.	-	
Hmotnost kameniva				
Objemová hmotnost	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,446	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,188	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,544	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	51,4	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	36,9	

Za správnost odpovídá :

ITT/DK04/02

Jaroslava Soukupová
zástupce vedoucího zkušební laboratoře

